

Stroh

Eine Zusammenstellung technischer, bauphysikalischer und ökologischer Kennzahlen

Straw

A compilation of technical, structural-physical and environmental indicators

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering (BSc)

der Fachhochschule FH Campus Wien

Bachelorstudiengang: Architektur – Green Building

Vorgelegt von:

Lukas Zakall

Personenkennzeichen

1710733053

Erstbegutachter:

Dipl.-Ing. Tobias Steiner

Eingereicht am:

11.07.2019

Erklärung:

Ich erkläre, dass die vorliegende Bachelorarbeit von mir selbst verfasst wurde und ich keine anderen als die angeführten Behelfe verwendet bzw. mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Ich versichere, dass ich dieses Bachelorarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Weiters versichere ich, dass die von mir eingereichten Exemplare (ausgedruckt und elektronisch) identisch sind.

Datum:

Unterschrift:

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob es auf Grund von bauphysikalischen, bautechnischen und ökologischen Aspekten sinnvoll ist, dass Stroh wieder vermehrt in der Baubranche zum Einsatz kommt.

In Zeiten des Klimawandels sind es vor allem nachwachsende Materialien, die immer mehr an Bedeutung gewinnen, da diese einen geringeren schädlichen Einfluss auf unsere Umwelt haben.

Mit dieser Arbeit sollen ökologische Aspekte wie Primärenergieinhalt, Treibhauspotential und Versauerungspotential von Stroh untersucht und mit anderen Baumaterialien verglichen werden.

Dabei soll auch untersucht werden, ob Stroh aus bautechnischer und bauphysikalischer Sicht mit herkömmlichen Baustoffen mithalten kann.

Es wird gezeigt wie Stroh als Wärmedämmung oder sogar als lasttragender Baustoff eingesetzt werden kann.

Zum Schluss erfolgt eine Gebäudeanalyse eines erbauten Strohballegebäudes in Österreich.

Abstract

This thesis deals with the question of whether it makes sense due to physical, structural and ecological aspects that straw is increasingly used again in the construction industry.

In times of climate change, it is above all renewable materials that are becoming more and more important as they have less harmful influence on our environment.

With this work, ecological aspects such as primary energy content, global warming potential and acidification potential of straw are to be investigated and compared with other building materials.

In the process, it will also be investigated whether straw can compete with conventional construction materials from a structural and building physics point of view.

The work shows how straw can be used as a thermal insulation or even as a load-bearing building material.

Finally, a building analysis of a built straw bale building in Austria is carried out.

Abkürzungsverzeichnis

AP	Acidification Potential (Versauerungspotential)
ASBN	Austrian Strawbale Network (Österreichisches Netzwerk für Strohballenbau)
GrAT	Gruppe Angepasste Technologie
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
IBO	Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie
OI	Ökoindex
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PEI	Primärenergieinhalt
PENR	Primärenergieinhalt nicht erneuerbar

Schlüsselbegriffe

Stroh	straw
Dämmstoff	insulation
Wärmeschutz	thermal protection
Feuchteschutz	moisture proofing
Schallschutz	noise protection
Brandschutz	fire protection
Treibhauspotential	global warming potential
Primärenergieinhalt	primary energy content
Versauerungspotential	acidification potential

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
SCHLÜSSELBEGRIFFE	VI
INHALTSVERZEICHNIS	VII
1. EINFÜHRUNG	1
1.1. Zum Thema – Problemstellung.....	1
1.2. Geschichtliches	1
2. STROH ALS BAUSTOFF	2
2.1. Definition von Stroh	2
2.2. Arten der Verwendung von Stroh als Baustoff	2
2.2.1. Lasttragende Konstruktionen	3
2.2.2. Nicht lasttragende Konstruktionen	3
3. BAUPHYSIKALISCHE KENNZAHLEN	4
3.1. Wärmeschutz	4
3.1.1. Wärmeleitung.....	4
3.1.2. Wärmespeicherung.....	5
3.1.3. Wärmebrücken.....	6
3.2. Brandschutz.....	7
3.3. Feuchteschutz.....	8
3.3.1. Ursachen für Feuchte im Bauteil.....	9
3.3.2. Einbaufeuchtigkeit.....	9
3.3.3. Feuchteintrag durch Lehmputz	9
3.3.4. Aufsteigende Feuchtigkeit.....	10
3.3.5. Witterungsschutz	11
3.3.6. Spritzwasserschutz	11
3.3.7. Kondensatbildung	11
3.3.8. Schimmelpilzbildung	13
3.4. Schallschutz.....	14
4. BAUTECHNISCHE KENNZAHLEN	15
4.1. Formate von Baustrohballen	15
4.2. Zertifizierte Baustrohballen	15
4.2.1. Waldland Baustrohballen	16

4.2.2.	S-House Ballen	16
4.2.3.	Baustroh	17
5.	BAUÖKOLOGISCHE KENNZAHLEN	18
5.1.	Primärenergieinhalt (PEI).....	18
5.2.	Treibhauspotential.....	19
5.3.	Versauerungspotential.....	20
5.4.	Bauökologische Analyse von Gebäuden (Eco2Soft).....	21
6.	DETAILBETRACHTUNG INKL. AUFBAUTEN	23
6.1.	Nicht tragende Wandkonstruktionen (Rahmensysteme)	23
6.1.1.	bautechnische Detailbetrachtung von Rahmensystemen	24
6.1.2.	bauphysikalische Detailbetrachtung von Rahmensystemen	25
6.1.3.	bauökologische Detailbetrachtung von Rahmensystemen	27
6.2.	Lasttragende Wandkonstruktionen.....	28
6.2.1.	bautechnische Detailbetrachtung.....	29
6.2.2.	bauphysikalische und bauökologische Detailbetrachtung.....	31
7.	BEST PRACTICE BEISPIEL STROHBALLENHAUS EBERGASSING.....	33
7.1.1.	architektonisches Konzept und Konstruktion	34
7.1.2.	Aufbauen inkl. bauphysikalischer und bauökologischer Kennzahlen	35
7.1.3.	Ökobilanz des gesamten Gebäudes.....	40
8.	ERGEBNIS DER ARBEIT UND SCHLUSSFOLGERUNG.....	42
	QUELLENVERZEICHNIS	43
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	45
	TABELLENVERZEICHNIS	48

1. Einführung

1.1. Zum Thema – Problemstellung¹

In Zeiten des Klimawandels gewinnen nachwachsende Rohstoffe immer mehr an Bedeutung. Die Baubranche ist nach wie vor zu einem großen Teil für die Erzeugung von Treibhausgasen verantwortlich, da noch immer zu viele umweltschädliche oder nicht regionale Baustoffe zum Einsatz kommen.

Die Verwendung von Stroh als Baumaterial reicht weit in die Vergangenheit zurück und gewinnt heute aufgrund klimatischer Aspekte wieder mehr an Bedeutung.

Mit dieser Arbeit soll geprüft werden, ob es sinnvoll ist, dass Stroh aufgrund bautechnischer und ökologischer Aspekte wieder vermehrt im Bausektor zum Einsatz kommen sollte.

1.2. Geschichtliches²

Die ersten Strohballebauten entstanden mit der Erfindung der Strohballepressen in den USA im 19. Jh. In holzarmen Gebieten wie Nebraska war Stroh reichlich vorhanden und wurde somit auch als Baumaterial genutzt. Mit dem industriellen Bauen verlor Stroh jedoch immer mehr an Bedeutung. Eine Neuentdeckung des Baumaterials fand in den USA in den 70er Jahren und in Europa um das Jahr 2000 statt. 1999 entstand das erste genehmigte nicht lasttragende Strohballehaus in Deutschland vom Architekten Matthias Böhnisch. 2002–2005 wurde das erste genehmigte lasttragendes Gebäude aus Strohballe in Deutschland durch Bauunternehmer Peter Weber erbaut. 2006 wurde die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Baustrohballe erteilt. In Österreich entstanden bisher über 120 Strohballehäuser.

¹ Verhoeven, Pascal: Strohballebau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 1

² Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballebau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 8-13

2. Stroh als Baustoff

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Einsatzformen von Stroh als Baustoff beschrieben.

2.1. Definition von Stroh

„Aus so ziemlich allen grasartig wachsenden Pflanzen dieser Welt lässt sich „Stroh“ herstellen: die getrockneten Pflanzen ohne Wurzeln und ohne Ähre (Blütenstand). Gewöhnlich verstehen wir unter Stroh die Stängel von Getreidesorten wie Weizen, Hafer, Roggen, Gerste, Hirse und Sorghum, aber auch Halme von Hopfen, Flachs, Hanf, Schilf, Elefantengras, Sonnenblumen oder Reis.“³

2.2. Arten der Verwendung von Stroh als Baustoff⁴

Grundsätzlich sind zwei Konstruktionssysteme bei Strohballenwänden zu unterscheiden:

Die lasttragende Bauweise, bei der die Strohballen auch tatsächlich statisch beansprucht werden.

Die nicht lasttragende Bauweise, bei der eine zusätzliche Tragkonstruktion erforderlich ist. Die Strohballen erfüllen hier ausschließlich den Zweck der Wärmedämmung.

³ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmut: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 6

⁴ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 37-40

2.2.1. Lasttragende Konstruktionen⁵

Die Strohballen selbst tragen das Dach bzw. die Geschossdecken. Wichtig sind hier eine starke Verdichtung der Strohballen und eine Vorspannung der Wände, also eine Verbindung des Ringbalkens mit dem Fundament mittels Gewindestangen oder Gurten. So können Schäden am Gebäude durch die nachträgliche Setzung der Strohballen verhindert werden.

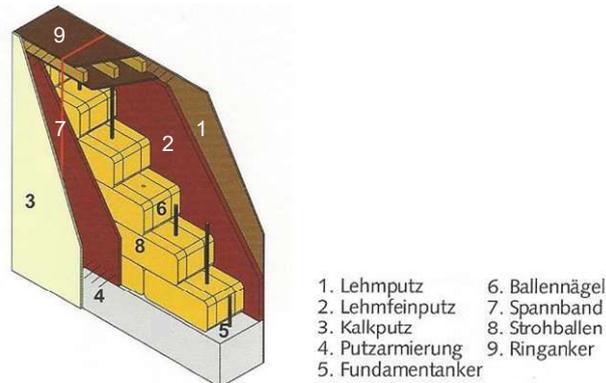


Abbildung 1: Lasttragende Strohballenwand

2.2.2. Nicht lasttragende Konstruktionen⁶

Hier erfolgt die Lastabtragung in den meisten Fällen durch Holzskelett- oder Holzrahmenbauweisen. Die Strohballen dienen nur als Wärmedämmung bzw. auch der Ausfachung der Tragkonstruktionen.

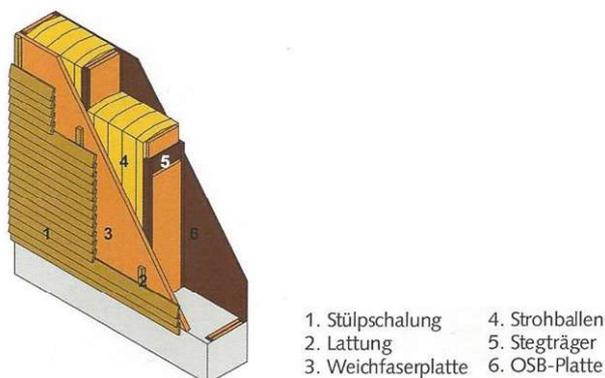


Abbildung 2: Nicht lasttragende Strohballenwand

⁵ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 37

⁶ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 37

3. Bauphysikalische Kennzahlen

3.1. Wärmeschutz

Die Bauphysik unterteilt den Wärmeschutz in winterlichen und in sommerlichen Wärmeschutz. Im Winter soll das Gebäude vor dem Auskühlen geschützt werden, was durch die Dämmwirkung eines Materials erreicht wird. Im Sommer soll sich das Gebäude durch hohe Außentemperaturen nicht zu sehr aufheizen, was unter anderem durch die Wärmespeicherfähigkeit eines Materials verhindert werden kann.

3.1.1. Wärmeleitung

Als Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird dessen Eigenschaft bezeichnet, Wärme zu transportieren. Temperaturunterschiede bewirken diesen Transport. Die Kennzahl für die Wärmeleitfähigkeit λ mit der Einheit W/mK beschreibt die Wärmemenge in Watt, die in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 bei einer Baustoffdicke von einem Meter und bei einem Temperaturunterschied von einem Kelvin hindurchfließt.⁷

Bei Wärmedämmungen versucht man also eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit zu erzielen, damit möglichst wenig Wärme aus dem Gebäude entweicht. Man kann sagen, dass ein Stoff umso besser Wärme leitet, je höher seine Dichte ist. Für Dämmstoffe eignen sich also vor allem Materialien, die eine eher geringe Dichte aufweisen, wie es auch bei Stroh der Fall ist.⁸

Die Wärmeleitfähigkeit bei Strohballen hängt von der Ausrichtung der Strohhalme ab. Erfolgt der Wärmetransport in selber Richtung, in der die Strohhalme ausgerichtet sind, ist die Wärmeleitfähigkeit des Strohs höher ($\lambda = 0,080 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),

⁷ Riccabona, Christof/ Bednar, Thomas: Baukonstruktionslehre 4. Bauphysik. 9. überarbeitete Auflage 2013. Wien: Manz Verlag 2013. S. 25

⁸ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 18.

erfolgt der Wärmetransport quer zur Ausrichtung der Halme, so ist die Wärmeleitfähigkeit geringer ($\lambda = 0,052 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).

Als Kennzahl dafür, wie gut eine Wand gedämmt ist, wird der U-Wert oder auch Wärmedurchgangskoeffizient herangezogen. Er beschreibt die Wärmemenge, die bezogen auf eine Fläche von 1 m^2 bei einem Temperaturunterschied von einem Kelvin verloren geht. Der U-Wert sollte also möglichst gering ausfallen, für eine gute Wärmedämmung.⁹

Berechnet wird der U-Wert mit der Formel:

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_{Se}}$$

U	Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
R_{Si}	innerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
d	Dicke der Bauteilschichten [m]
λ	Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschichten [$\text{W}/(\text{mK})$]
R_{Se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

3.1.2. Wärmespeicherung

Je größer die Dichte eines Materials, desto besser die Wärmespeicherung und desto schlechter die Wärmedämmung. Organische Stoffe speichern doppelt so viel Wärme, wie mineralische Stoffe bei gleicher Dichte. Die Stoffkonstante für die Speicherung der Wärme eines Stoffes ist die spezifische Wärmespeicherfähigkeit c mit der Einheit $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$. Sie beschreibt, wieviel Energie erforderlich ist, um einen kg eines Stoffes um 1 Kelvin zu erwärmen. Je höher dieser Wert also ist, desto langsamer erwärmt sich ein Material und desto günstiger wirkt er sich auf die

⁹ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 18-19

Speicherfähigkeit des Stoffes aus. Die absolute Speicherfähigkeit eines Materials errechnet sich aus der Multiplikation seiner spezifischen Wärmespeicherfähigkeit c , seiner Dichte ρ und seines Volumens V .¹⁰

Baustoffe, die gut Wärme speichern können, sorgen dafür, dass sich Gebäude tagsüber bei hohen Temperaturen nicht so schnell aufheizen, da sich solche Baustoffe nur sehr langsam erwärmen. Genauso langsam erfolgt eine Auskühlung in der Nacht bei niedrigeren Temperaturen. Sie sorgen also dafür, dass die Raumtemperatur bei Außentemperaturschwankungen konstant bleibt.

Der Fachverband für Strohballenbau Deutschland nennt eine spezifische Wärmekapazität für typische Getreidesorten von 2,0 kJ/kg·K. Verglichen mit anderen Dämmstoffen ist die Wärmespeicherfähigkeit von Stroh damit sehr gut. Bei Mineralwolle liegt die spezifische Wärmekapazität beispielsweise bei nur 1 kJ/kg·K. Die Kombination von Strohkonstruktionen mit massiven Lehmputzen kann die Wärmespeicherung von Strohkonstruktionen zusätzlich verbessern.¹¹

3.1.3. Wärmebrücken

In Bereichen von Wärmebrücken finden höhere Wärmeflussdichten als in der umgebenden, ungestörten Wand statt. Gekennzeichnet werden Wärmebrücken durch einen höheren Wärmestrom und geringere Wandinnentemperaturen, als die umgebende Wandfläche. Als thermische Schwachstellen können Wärmebrücken zu Problemen wie Schimmelbildung und zu höheren Heizkosten führen. Eine Art der Wärmebrücken ist die materialbedingte Wärmebrücke. Sie wird ein durch einen Wechsel von Baustoffen mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit innerhalb des Bauteils hervorgerufen.¹²

¹⁰ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 19

¹¹ Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.: Strohbaurichtlinie 2014. In URL: <http://fasba.de/wp-content/uploads/2016/05/SBR-2014-11-22-end.pdf> (letzter Zugriff: 19.03.2019). S. 11

¹² Riccabona, Christof/ Bednar, Thomas: Baukonstruktionslehre 4. Bauphysik. 9. überarbeitete Auflage 2013. Wien: Manz Verlag 2013. S. 38-39

Beim Strohballenbau entstehen Wärmebrücken durch Fugen zwischen den Ballen oder durch Fugen zwischen den Ballen und Fenster- oder Türrahmen. Auch die Holzrahmen selbst, die die Konstruktion vollständig durchdringen können zu Wärmebrücken führen, da Holz eine dreimal so hohe Wärmeleitfähigkeit wie Stroh aufweist.¹³

3.2. Brandschutz

Der Brandschutz für Gebäude ist in der OIB Richtlinie 2 geregelt. Die OIB Richtlinie 2 stellt einerseits Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und andererseits Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen.

Mit den Anforderungen an das Brandverhalten werden die Baustoffe in die Brandklassen A bis F unterteilt, wobei A nicht brennbare Baustoffe betrifft und F leicht entflammbare Baustoffe betrifft. Je nach Brennbarkeit der Materialien, also je nachdem, welche Brandklasse A bis F ein Baustoff erreicht, erfolgt eine Zuteilung in die jeweiligen Gebäudeklassen. Die Mindestanforderung in der Gebäudeklasse 1 ist die Brandklasse E, also normal entflammbare Baustoffe. Ab der Gebäudeklasse 2 werden die Klassen D oder höher gefordert.

Mit der Anforderung an den Feuerwiderstand werden Bauteile, wie zum Beispiel Wandaufbauten, nach ihrer Tragfähigkeit R, dem Raumabschluss E und der Wärmedämmung I untersucht. Mit einer zusätzlichen Zeitangabe wird erläutert, wie lange die jeweilige Eigenschaft erhalten bleibt. R30 bedeutet zum Beispiel, dass die Tragfähigkeit eines Bauteils im Brandfall für 30 Minuten erhalten bleibt.¹⁴

Für Stroh ist beim Brandverhalten die Baustoffklasse E anzusetzen, womit Strohbauten ausschließlich in der Gebäudeklasse 1 Anwendung finden. Die Gebäudeklasse 1 sieht laut der OIB-Richtlinie darüber hinaus einen Feuerwiderstand für tragende Wände von R 30 und für brandabschnittsbildende Wände an der Nachbargrundstücks- bzw. Bauplatzgrenze von REI 60 vor. Somit muss eine Strohballenwand idealerweise ihre Tragfähigkeit, ihren Raumabschluss

¹³ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 20

¹⁴ Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 2. Brandschutz. OIB-330.2-011/15. März 2015. S.14-15

und ihre Wärmedämmung während eines Brandfalls für 60 Minuten aufrechterhalten.¹⁵

„Gebäude der Gebäudeklasse 1 (GK1):

Freistehende, an mindestens drei Seiten auf eigenem Grund oder von Verkehrsflächen für die Brandbekämpfung von außen zugängliche Gebäude mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschoßen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus einer Wohnung oder einer Betriebseinheit von jeweils nicht mehr als 400 m² Brutto-Grundfläche der oberirdischen Geschoße.“¹⁶

Entscheidend für eine schlechte Brennbarkeit ist eine dichte Pressung des Stroh. Denn umso weniger Luftzwischenräume vorhanden sind, desto schlechter kann sich das Feuer im Stroh ausbreiten. Als noch widerstandsfähiger erweisen sich Strohballenwände, wenn sie verputzt sind. Als Beispiel konnte bei einem Test in Deutschland eines beidseitig verputzten Wandaufbaus die Wand 90 Minuten dem Feuer widerstehen.¹⁷

3.3. Feuchteschutz

Durch einen zu hohen Feuchtegehalt im Bauteil kann es zu Schimmelpilzbildung kommen, was einerseits die Zerstörung des Baumaterials und andererseits gesundheitliche Folgen für die Bewohner zur Folge haben kann. Darüber hinaus führt eine erhöhte Feuchte zur Verringerung der Dämmwirkung der Strohdämmung. Bauteile müssen also besonders vor Feuchte geschützt werden.

¹⁵ Fachverband Strohhallenbau Deutschland e.V.: Strohbaurichtlinie 2014. In URL: <http://fasba.de/wp-content/uploads/2016/05/SBR-2014-11-22-end.pdf> (letzter Zugriff: 28.03.2019). S. 9

¹⁶ Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie. Begriffsbestimmungen. Oktober 2011. S.5

¹⁷ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 42

3.3.1. Ursachen für Feuchte im Bauteil¹⁸

Feuchteschäden können einerseits während der Bauphase und andererseits während der Nutzungsphase des Gebäudes entstehen.

Während der Bauphase ist primär auf die Einbaufeuchte des Stroh zu achten, aber auch darauf, dass der Putz, der in den meisten Fällen direkt auf das Stroh aufgetragen wird, ordnungsgemäß aufgebracht wird.

Während der Nutzungsphase führen in den meisten Fällen eine mangelnde Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit, Spritzwasser, Regen, Kondensat und Wasserschäden zu einem Feuchteproblem.

3.3.2. Einbaufeuchtigkeit¹⁹

Stroh muss bereits vor dem Einbau vor Feuchte und Regen geschützt werden. Der Feuchtegehalt für Baustroh sollte dabei vor dem Einbau laut der deutschen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-23.11-1595 maximal 15 Gewichtsprozent betragen. Eine Vorfertigung von Strohbauteilen in witterungsgeschützten Produktionswerken kann eine Lösung für das Problem der Einbaufeuchte sein. Ist ein Einbau vor Ort auf der Baustelle geplant, hat dieser auf jeden Fall in den Sommermonaten zu erfolgen, da eine bessere Trocknung des Stroh bei höheren Temperaturen und der damit verbundenen geringeren relativen Luftfeuchtigkeit erfolgen kann.

3.3.3. Feuchteeintrag durch Lehmputz²⁰

In den meisten Fällen werden die Oberflächen von Strohballenwänden direkt mit Lehm verputzt, da Lehm so wie Stroh besonders umweltschonend ist und die

¹⁸ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 27

¹⁹ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 28

²⁰ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 29

gesamte Konstruktion durch den Lehmputz feuerbeständiger wird. Da Lehmputz aber einen hohen Feuchtegehalt aufweist, kann es zu einem Feuchteeintrag in die Strohballenwand kommen.

Daher sollte beim Auftragen des Lehmputzes folgendes beachtet werden:

- Das Aufbringen des Putzes sollte spätestens im Hochsommer erfolgen, um eine gute Trocknung zu garantieren.
- Bei der Verwendung von Putzmaschinen ist der Feuchteeintrag wesentlich geringer, als beim händischen verputzen der Wände.
- Die Trocknungszeiten zwischen dem Aufbringen von Lehmputz, Grundputz und Oberputz müssen eingehalten werden. Die Trocknungszeit von Lehmputz beträgt ca. 1 mm pro Tag.

3.3.4. Aufsteigende Feuchtigkeit

Durch aufsteigende Bodenfeuchte kann Wasser über das Fundament in Wandaufbauten eindringen und dort Schäden verursachen. Die Kapillarität eines Baustoffes wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten w beschrieben. Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt wieviel kg Wasser in einer Stunde über eine Saugfläche eines Stoffes von 1 m^2 aufgenommen werden kann.²¹

Zum Vergleich ist bei Vollziegel $w = 20 - 30 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$, bei einem typischen Fundament aus Stahlbeton $w = 1,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ und bei Stroh $w = 1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$.²²

Schutz vor diesem Feuchtetransport bieten horizontale Sperren in Form von Bahnen aus Bitumen, Kunststoff oder Metall.²³

²¹ Universität Duisburg-Essen: Bauphysik-Interaktiv. In URL: https://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_fe_wasserauf1.htm (letzter Zugriff: 09.04.2019)

²² Magazin für gesundes Wohnen und Bauen: Baustoffkatalog. In URL: <https://www.ib-rauch.de/okbau/stoffwert/suchen01.php> (letzter Zugriff: 09.04.2019)

²³ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 21

3.3.5. Witterungsschutz²⁴

Gegen Witterungseinflüsse, wie Niederschlag oder Wind können Strohballenwände durch hinterlüftete Fassaden, durch witterungsfeste Putze oder durch Dachüberstände geschützt werden.

3.3.6. Spritzwasserschutz²⁵

Die Fassade ist bis zu einer Höhe von mindestens 0,3 m über Geländeoberkante vor Spritzwasser zu schützen. Idealerweise beginnt die Strohdämmung erst oberhalb dieser Höhe. Ist das nicht möglich so können auch bestimmte Putze oder Platten den Spritzwasserschutz bilden. Die Oberfläche des Geländes unmittelbar vor der zu schützenden Wand hat ebenfalls Auswirkungen auf einen guten Feuchteschutz. So verringert eine raue Oberfläche wie Kies zusätzlich die Gefahr für Spritzwasser.

3.3.7. Kondensatbildung

Druckunterschiede zwischen beheiztem Innen- und kaltem Außenraum bewirken einen Transport von in der Luft enthaltenen Wasserdampf von innen nach außen durch Bauteile hindurch. Dieser Vorgang wird als Wasserdampfdiffusion bezeichnet. Je dampfdichter eine Bauteilschicht ist, desto mehr behindert diese den Diffusionsvorgang. Diese Eigenschaft eines Materials wird durch die einheitslose Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ beschrieben. Sie gibt an, um wieviel dichter eine Materialschicht ist, als eine gleich dicke Luftschicht. Je höher μ ist, desto dampfdichter ist ein Material. Eine Materialschicht ist auch umso dichter, je dicker sie ist. Das Produkt aus der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ und der Schichtdicke des Materials d ergibt die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d in Meter. Bei Luft entspricht $\mu = 1$. Ein

²⁴ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. 1. Auflage 2004. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2004. S. 30

²⁵ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 21

Wert von $s_d = 10$ m entspräche also dem Diffusionswiderstand einer 10 Meter dicken Luftschicht.²⁶

Um Kondensat im Bauteil zu verhindern, sollte der Wärmedämmwert der Bauteilschichten von innen nach außen zunehmen und der Diffusionswiderstand der Bauteilschichten von innen nach außen abnehmen. Hätte beispielsweise die äußerste Bauteilschicht einen höheren s_d -Wert als die restlichen Schichten des Bauteils, so würde diese die Dampfdurchlässigkeit stark behindern. Als Folge würde sich Kondensat an der Innenseite dieser Bauteilschicht bilden, was zu Schäden im gesamten Bauteil führen kann.²⁷

Für Strohballenwände gilt für die äußerste und innerste Bauteilschicht:

$$s_{d \text{ innen}} \geq 10 \cdot s_{d \text{ außen}}$$

$$s_{d \text{ innen}} \leq 5 \text{ m}$$

Bei einem Außenkalkputz mit $\mu = 10$, einer Strohdämmung mit $\mu = 2$ und einem Lehminnenputz mit $\mu = 8$, kann zusätzlich ein dampfbremsender Anstrich auf den Lehminnenputz aufgetragen werden, um den Diffusionswiderstand innen zu erhöhen und die Diffusionsoffenheit nach außen zu gewährleisten.²⁸

Generell sollte ein Feuchtegehalt von 15 Masseprozent des Stroh nie überschritten werden.²⁹

²⁶ Pech, Anton: Baukonstruktionen. Bauphysik. Wien: fh-campus wien. Skriptum. WS 2017/18. S.25

²⁷ Pech, Anton: Baukonstruktionen. Bauphysik. Wien: fh-campus wien. Skriptum. WS 2017/18. S.26

²⁸ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 23

²⁹ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. 1. Auflage 2004. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2004. S. 31

3.3.8. Schimmelpilzbildung³⁰

Unter bestimmten Gegebenheiten können Schimmelpilze bei allen organischen Materialien auftreten. Das Wachstum von Schimmelpilzen ist bedingt durch die Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur, die Substratklasse des zu betrachteten Materials, den Feuchtegehalt im Baustoff selbst und auch dadurch wie sehr auf den konstruktiven Feuchteschutz geachtet wurde. Kommt es einmal zum Schimmelpilzbefall, kann es zu Bauschäden und zur Freisetzung gesundheitsschädlicher Stoffe kommen.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Schimmelpilzbildung im Temperaturbereich von 0 – 50 °C auftritt, jedoch unter einer relativen Luftfeuchte der direkt an der Bauteiloberfläche anliegenden Luftschicht von 70 % nicht mehr stattfindet.

Bei Baustoffen erfolgt laut Sedlbauer (2001) eine Einteilung in vier Substratgruppen, Substratgruppe 0 bis Substratgruppe III. Die Substratgruppe 0, darunter fallen biologische Vollmedien, bietet sehr gute Bedingungen für das Aufkommen von Schimmelpilzen, während bei Substratgruppe III, das sind zum Beispiel Metalle oder Gläser, kaum Schimmelpilzbefall möglich ist. Stroh wurde in die Substratgruppe I eingestuft, drunter fallen biologisch verwertbare Substrate, wie Tapeten oder Gipskarton. Stroh hat daher ein erhöhtes Schimmelpilzrisiko.

Um den Schimmelpilzbefall in der Strohkonstruktion trotzdem zu vermeiden, sollte ein maximaler Feuchtegehalt von 0,15 g Wasser pro 1,0 g Stroh nicht überschritten werden. Um dieses Ziel einhalten zu können, ist für einen konstruktiven Feuchteschutz ausreichend Witterungsschutz, Spritzwasserschutz, Schutz gegen aufsteigende Feuchte und ein nach außen hin diffusionsoffener Aufbau vorzusehen.

³⁰ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 23-24

3.4. Schallschutz

Der bauliche Schallschutz ist in der OIB-Richtlinie 5 geregelt und ist abhängig vom maßgeblichen Außenlärmpegel und der Gebäudenutzung. Je nach dem welcher maßgebliche Außenlärmpegel in Dezibel am Standort gemessen wird, können den Tabellen der OIB-Richtlinie 5 entsprechende Mindestwerte für das bewertete Schalldämmmaß R_w entnommen werden. Ergeben sich aus den Tabellen der OIB-Richtlinie 5 keine höheren Werte, darf ein bewertetes Schalldämmmaß von 43 dB jedoch nie unterschritten werden.³¹

Bei einem Beispiel eines Wandaufbaus in der Strohbaurichtlinie 2014 des Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß R_w von 44 dB. Als Beispiel wird eine Holzständerwand mit 36 cm Strohdämmung und beidseitig angebrachten Holzfaserdämmplatten, die als Putzträger fungieren herangezogen.³²

Das Beispiel zeigt also, dass die Anforderungen für den Schallschutz, die sich aus der OIB-Richtlinie 5 ergeben für Strohballenwände erfüllt werden können. Darüber hinaus hat die Bauweise mit Strohballen den vorteilhaften Effekt, dass die Ballen eine Art von Federwirkung aufweisen und gleichzeitig den Schall absorbieren.³³

³¹ Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 5. Schallschutz. OIB-330.5-002/15. März 2015. S.2

³² Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.: Strohbaurichtlinie 2014. In URL: <http://fasba.de/wp-content/uploads/2016/05/SBR-2014-11-22-end.pdf> (letzter Zugriff: 01.04.2019) S. 11

³³ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 26-27

4. Bautechnische Kennzahlen

4.1. Formate von Baustrohballen³⁴

Das Format des Strohballeus ist abhängig von der eingesetzten Strohballeupresse. In der Strohverarbeitung werden Rundballeupressen und Quaderballeupressen verwendet. Für Baustrohballen eignen sich Quaderballeupressen, die abhängig von ihrer Breite und Höhe Kleinballen und Großballen produzieren können. Formate bis zu einem Querschnitt von 40 cm x 50 cm gelten als Kleinballen, größere Querschnitte gelten als Großballen. Bei der Verwendung von Großballen ist oft ein erhöhter Maschineneinsatz erforderlich, was für den Selbstbau eher ungünstig ist.

Da für Stroh noch keine eigenen Normen existieren, ist für viele der zu verwendenden Baustrohballen erst deren Brauchbarkeit und Verwendbarkeit nachzuweisen. Das hat zum Nachteil, dass zunächst oft Materialprüfungen erfolgen müssen, bevor das Stroh für den Bau verwendet werden darf. Die Lösung ist die Verwendung zertifizierter Baustrohballen, deren Brauchbarkeit und Verwendbarkeit bereits nachgewiesen ist.

4.2. Zertifizierte Baustrohballen

Ein wichtiger Punkt für die Standardisierung des Strohs und damit der möglichen Aufnahme in Normen ist die Bereitstellung zertifizierter Baustrohballen. Damit würden nicht nur Haftungsfragen geklärt werden, sondern auch eine Verbesserung der Qualität des Baustrohs erfolgen. Darüber hinaus können mit einer Zertifizierung baubehördliche Hürden leichter überwunden werden. Im Großen und Ganzen kann eine Zertifizierung von Baustrohballen dazu führen, dass sich der Strohballeubau und damit eine umweltschonendere Bauweise besser in der Baubranche etablieren kann und sich im Endeffekt wieder mehr verbreitet. Einen ersten Schritt in Richtung Standardisierung von Strohballeus als

³⁴ Fachverband Strohballeubau Deutschland e.V.: Strohbaurichtlinie 2014. In URL: <http://fasba.de/wp-content/uploads/2016/05/SBR-2014-11-22-end.pdf> (letzter Zugriff: 02.04.2019) S. 7-8

Baumaterial haben Produkte, wie Waldland Baustrohballen, S-House Ballen oder das in Deutschland zugelassene Baustroh gemacht. Für diese Produkte gibt es nämlich bereits eine Zertifizierung.³⁵

4.2.1. Waldland Baustrohballen³⁶

Waldland Baustrohballen sind mit der europäischen technischen Zulassung in der Europäischen Union verfügbar. Genutzt werden Waldland Baustrohballen als nicht lastabtragende Wärmedämmung in Wand-, Dach-, Decken-, und Bodenaufbauten. Der Strohhallen bestehend aus 100 % Weizenstroh wird auf eine Dichte bis zu 120 kg/m³ gepresst und mit Kunststoff- oder Sisalschnüren zusammengehalten. Mit folgenden Abmessungen werden die Strohhallen produziert:

Tabelle 1: Formate von Waldland Baustrohballen

Nennstärke [mm]	250 bis 900
Nennlänge [mm]	270 bis 1250
Nennbreite [mm]	400 bis 1250

4.2.2. S-House Ballen³⁷

S-House Ballen sind mit der österreichischen technischen Zulassung ausschließlich in Österreich verfügbar. Die gepressten Getreidestrohhallen werden mit Schnüren zusammengebunden und können eine Dichte von bis zu 108 kg/m³ erreichen.

³⁵ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 7

³⁶ Österreichisches Institut für Bautechnik: Europäische Technische Zulassung ETA-10/0032. 03.06.2013

³⁷ Verhoeven, Pascal: Strohhallenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 14

Auch diese Strohballen sind in verschiedenen Größen verfügbar:

Tabelle 2: Formate von S-House Ballen

Nennstärke [mm]	20 bis 130
Nennlänge [mm]	20 bis 260
Nennbreite [mm]	20 bis 130

4.2.3. Baustroh³⁸

Die Strohballen mit dem Produktnamen Baustroh sind mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für Deutschland zugelassen. Verwendung findet das Produkt in Außenwandaufbauten mit einem lichten Abstand von weniger als einem Meter zwischen den Holzständern. Der Strohballen ist nicht für lastabtragende Funktionen vorgesehen. Bei der Pressung erhalten die Ballen eine Dichte von bis zu 115 kg/m³. In folgenden Formaten ist das Baustroh erhältlich:

Tabelle 3: Formate von Baustroh

Nennstärke [mm]	200 bis 700
Nennlänge [mm]	500 bis 3000
Nennbreite [mm]	300 bis 900

³⁸ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 16

5. Bauökologische Kennzahlen

„Unter dem Begriff Bauökologie wird die Berücksichtigung umweltschonender Aspekte beim Bauen zusammengefasst. Dabei sollen durch die Bautätigkeit und die verwendeten Materialien möglichst geringe Eingriffe in die Naturkreisläufe vorgenommen werden. Die Bauökologie betrachtet den gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung bis zur Beseitigung des Gebäudes: Sie strebt an, alle Umweltbelastungen möglichst gering zu halten und für die Nutzungsphase eine Langlebigkeit der Materialien zu gewährleisten, ein hohes Niveau des Wohlbefindens für den Nutzer zu erreichen sowie eine Wiederverwertung der Materialien zu ermöglichen.“³⁹

In diesem Kapitel werden die bauökologischen Aspekte des Baustoffs Stroh, unter Berücksichtigung des Primärenergieinhalts, des Treibhauspotentials und des Versauerungspotentials untersucht

5.1. Primärenergieinhalt (PEI)

Der Primärenergieinhalt (PEI) eines Baustoffs bezeichnet die Energie, die aufgewendet werden muss, um ein Material herzustellen, wobei ausschließlich Energie aus nicht erneuerbaren Quellen berücksichtigt wird. Je geringer der Primärenergieinhalt eines Stoffes ist, desto umweltschonender ist seine Herstellung, da nur ein geringer Anteil an nicht erneuerbaren Energien aufgewendet werden muss.

Naturnahe Baustoffe wie Stroh benötigen meist deutlich weniger Energie für die Herstellung als industrielle Baustoffe wie Zement. Bei Strohballen wurde unter Berücksichtigung des Pressens der Strohballen, des Primärenergieinhalts der Kunststoffschnur, die den Ballen zusammenhält, Lade- und Transporttätigkeiten und der Art der verwendeten Maschinen ein Primärenergieinhalt von bis zu 63 kWh/t ermittelt. Dabei setzen sich die Anteile, aus denen sich der PEI eines Strohballens zusammensetzt wie folgt zusammen: Während 19 % für Lade- und Transporttätigkeiten aufgewendet werden und 29 % für das Pressen der Ballen,

³⁹ Westermann, Stephan: Bauökologie. In: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/b/bauoekologie-1547119> (letzter Zugriff: 04.04.2019)

macht den größten Anteil des PEI der Primärenergieinhalt der Kunststoffschur mit 52 % aus. Dabei ist die Herstellung einer solchen Kunststoffschur nicht unbedingt energieaufwändig, sondern vielmehr der Energieaufwand der anderen Anteile, die den PEI eines Strohballens ausmachen besonders gering.⁴⁰

Der Vergleich mit anderen Dämmstoffen verdeutlicht, wie gering der Primärenergieinhalt von Strohballen ist:

Tabelle 4: Primärenergieinhalt von Strohballen verglichen mit anderen Dämmstoffen

Dämmstoffbezeichnung	PEI [kWh/t]
Stroh Quaderballen	55
Stroh HD-Ballen	70
Mineralwolle	4.860
Polystyrol, XPS	28.000

5.2. Treibhauspotential

Pflanzen nehmen während der Photosynthese CO₂ aus der Luft auf und geben Sauerstoff an die Luft ab. Verrottet eine Pflanze, oxidiert das in der Pflanze gespeicherte CO₂ mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff. Es wird also dieselbe Menge an CO₂ wieder an die Luft abgegeben, die die Pflanze während ihrer Lebensdauer gespeichert hat. Der Lebenszyklus einer Pflanze ist also CO₂-neutral. Durch das Ernten des Strohs, wird dieses vor dem Prozess der Verrottung bewahrt. Somit bleibt das CO₂, das das Stroh während seiner Lebensdauer aufgenommen hat auch noch nach dem Mähen in der Struktur der Pflanze enthalten. Bei der Verwendung von Stroh als Wärmedämmung wird das Gebäude, in dem das Stroh zum Einsatz kommt somit zum CO₂-Speicher. Der Kohlenstoffanteil des Strohs beträgt 42 %, somit speichert 1 Tonne Stroh 420 kg Kohlenstoff.⁴¹

⁴⁰ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 29

⁴¹ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 29

Der Indikator „GWP 100 Summe“ beschreibt unter Berücksichtigung des Beitrags an Treibhausgasemissionen eines Stoffes und der Speicherfähigkeit von Kohlendioxid eines pflanzlichen Stoffes, mit wie viel Kilogramm CO₂ die Atmosphäre für eine Dauer von 100 Jahren durch die Verwendung eines bestimmten Stoffes entweder be- oder entlastet wird.⁴²

Bei Stroh ist das Globale Erwärmungspotential bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren, also der „GWP 100 Summe“, durch seine Speicherfähigkeit von Kohlendioxid negativ. Für Stroh wurde ein „GWP 100 Summe“ von ca. -1,25 (kg CO₂ eq.)/kg ermittelt. Das bedeutet, dass unsere Atmosphäre durch die Verwendung von Stroh über einen Nutzungszeitraum von 100 Jahren um ca. 1,25 kg CO₂ pro kg Stroh entlastet wird. Der Vergleich mit anderen Dämmstoffen verdeutlicht das Potential des Strohs:

Tabelle 5: Globales Erwärmungspotential von Stroh verglichen mit anderen Dämmstoffen

Dämmstoffbezeichnung	GWP 100 Summe [(kg CO ₂ eq.)/kg]
Stroh	-1,246
Zellulosefaserplatte	-0,244
Glaswolle	2,454
Polystyrol expandiert (EPS)	4,169

5.3. Versauerungspotential

„Versauerung wird hauptsächlich durch die Wechselwirkung von Stickoxid- (NO_x) und Schwefeldioxidgasen (SO₂) mit anderen Bestandteilen der Luft verursacht. Zu den eindeutig zugeordneten Folgen zählt u.a. die Versauerung von Seen und Gewässern, welche zu einer Dezimierung der Fischbestände in Zahl und Vielfalt führt.“⁴³

⁴² Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: https://www.baubook.info/BTR/PHP/Win_Fragezeichen.php?SF=KW_GWP100&SW=5 (letzter Zugriff: 05.04.2019)

⁴³ Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: https://www.baubook.info/BTR/PHP/Win_Fragezeichen.php?SAT=91&SW=27&SG_open=283 (letzter Zugriff: 06.04.2019)

Bei der Herstellung vieler Baumaterialien werden durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe säurebildende Schwefeldioxidgase frei. Eine Wechselwirkung dieser Gase mit der Luft führt zur Entstehung von Salpetersäure und Schwefelsäure, die dann als saurer Regen niedergehen und Boden und Gewässer kontaminieren.

Die Einheit des Versauerungspotenzials (AP) ist (kg SO₂ eq.)/kg. Das Versauerungspotential AP gibt also an, wie viel kg SO₂ (säurebildendes Schwefeldioxidgas) bei der Herstellung von einem kg eines bestimmten Stoffes freigesetzt wird. Dass das Versauerungspotential von Strohballen weit unter dem Versauerungspotential anderer Dämmstoffe liegt, hat vermutlich mit dem geringen Energieaufwand bei seiner Herstellung zu tun. Der Vergleich mit anderen Baustoffen unterstützt diese Vermutung und unterstreicht nochmal das ökologische Potential von Stroh:

Tabelle 6: Versauerungspotential von Stroh verglichen mit anderen Dämmstoffen

Dämmstoffbezeichnung	AP [(kg SO ₂ eq.)/kg]
Stroh	0,0009
Zellulosefaserplatte	0,0051
Glaswolle	0,0153
Polystyrol expandiert (EPS)	0,0149

5.4. Bauökologische Analyse von Gebäuden (Eco2Soft)⁴⁴

Um den gesamten Umwelteinfluss eines Gebäudes zu ermitteln, kann das Berechnungstool Eco2Soft, das von der Web-Plattform baubook bereitgestellt wird, eingesetzt werden. So können nicht nur Primärenergieinhalt, Treibhauspotential und Versauerungspotential der einzelnen Materialien bestimmt werden, sondern auch der gesamten Konstruktion bzw. des gesamten Gebäudes. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet. Das umfasst zusätzlich also auch den Transport von Baumaterial zur Baustelle, die Herstellung

⁴⁴ Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: https://www.baubook.info/Download/eco2soft_Folder.pdf (letzter Zugriff: 07.04.2019)

von Haustechnikkomponenten, den Austausch von Bauteilen, innerhalb der Nutzungsdauer, den Betrieb des Gebäudes, sowie den Rückbau des Gebäudes.

Eine derartige bauökologische Bilanzierung dient als Basis für Fördermodelle und Zertifizierungssysteme im Wohnbau.

6. Detailbetrachtung inkl. Aufbauten

Im folgenden Kapitel wird der Einsatz von Strohballen in Wandaufbauten aus bautechnischer, bauökologischer und bauphysikalischer Sicht im Detail betrachtet. Eine grundlegende Unterscheidung der Wandsysteme im Strohballenbau erfolgt dabei in nicht lasttragende und lasttragende Wandkonstruktionen.

6.1. Nicht tragende Wandkonstruktionen (Rahmensysteme)

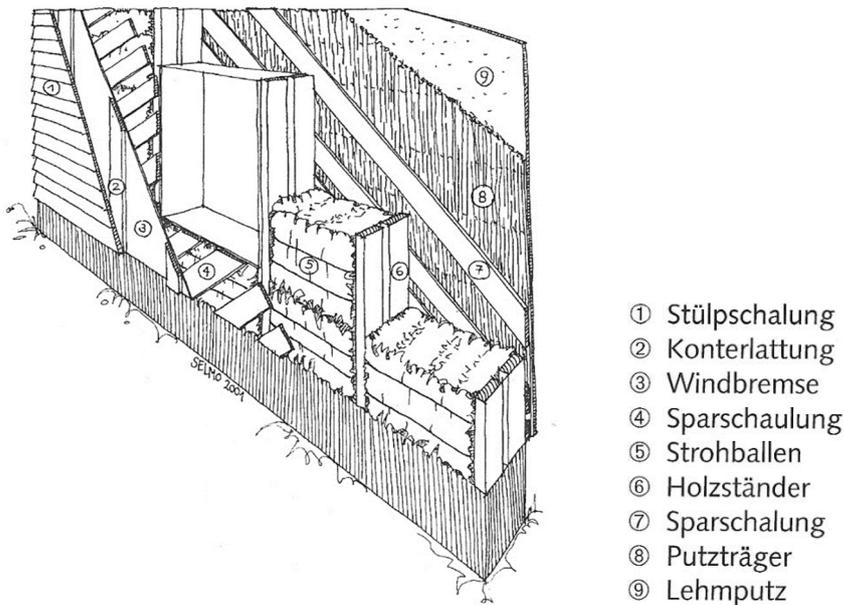
Kommt Stroh bei nicht tragenden Wandkonstruktionen zum Einsatz, erfüllen die eingesetzten Strohballen lediglich die Aufgabe der Wärmedämmung und werden nicht statisch beansprucht. Die tragende Funktion wird durch Holzkonstruktionen übernommen. Dabei werden Rahmen-, Skelett-, und Scheibensysteme unterschieden. Nicht tragende Strohballenkonstruktionen kommen in Österreich verglichen mit der lastabtragenden Variante weitaus häufiger vor, da hier vor allem eine Baugenehmigung leichter zu erreichen ist. Darüber hinaus kann bei nicht lasttragenden Konstruktionen das Dach bereits nach Erstellung der Tragkonstruktion aus Holz und vor Einbau der Strohballen aufgesetzt werden. So erfolgt der Einbau der Strohballendämmung witterungsgeschützt. Auch die Öffnungen in der Fassade für Türen oder Fenster können dank der Holzkonstruktion bei dieser Variante weit größer ausgestaltet werden, als beim lasttragenden Strohballenbau ⁴⁵

In diesem Kapitel wird als Beispiel für eine bautechnische, bauphysikalische und bauökologische Detailbetrachtung von nicht lastabtragenden Strohballenkonstruktionen ein Rahmensystem herangezogen, da dieses in der Praxis besonders verbreitet ist. Die Rahmenbauweise wird auch als Holzständerbauweise bezeichnet.

⁴⁵ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 51

6.1.1. bautechnische Detailbetrachtung von Rahmensystemen

Bei Rahmensystemen werden die Strohballen zwischen den lastabtragenden, vertikalen Holzrahmen übereinander eingepasst, wobei der Abstand dieser vertikalen Holzrahmen von den Abmessungen der Strohballen abhängig ist. Die Holzrahmen sind meist mit Kork zwischengedämmte Doppelholzständer, um dem Wärmebrückeneffekt entgegenzuwirken. Eine Aussteifung des Wandsystems erfolgt durch eine Diagonallattung oder durch OSB-Platten:⁴⁶



- ① Stülpchalung
- ② Konterlattung
- ③ Windbremse
- ④ Sparschalung
- ⑤ Strohballen
- ⑥ Holzständer
- ⑦ Sparschalung
- ⑧ Putzträger
- ⑨ Lehmputz

Abbildung 3: Rahmensystem

Vorteile von Rahmensystemen:⁴⁷

- Die gesamte Wandkonstruktion kann inkl. Strohballendämmung, Wandverschalung und Ausnehmungen für Türen und Fenster im Werk vorgefertigt werden. Somit erfolgt der Einbau der Strohballen witterungsgeschützt. Außerdem werden durch eine Vorfertigung Kosten und Zeit gespart.
- Die Holzrahmen bieten außerdem beidseitig die Möglichkeit der Befestigung von Installationsebene und Fassade.

⁴⁶ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 72

⁴⁷ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 72

Nachteile von Rahmensystemen:⁴⁸

- Trotz einer Zwischendämmung der Holzständer durch Kork lassen sich Wärmebrücken nicht vollständig vermeiden.
- Durch die Holzrahmen und Diagonallattungen ist der Holzanteil bei Rahmensystemen verglichen mit anderen Systemen relativ hoch, was zu höheren Kosten und zu einem höheren Arbeitsaufwand führt.
- Weiters muss durch die Strohballenabmessungen ein gleichbleibendes Rastermaß beim gesamten Wandaufbau eingehalten werden.

6.1.2. bauphysikalische Detailbetrachtung von Rahmensystemen

Mit der Studie „Wandaufbauten aus nachwachsenden Rohstoffen“ der GrAT wurde das Rahmensystem in Zusammenarbeit mit dem ASBN und dem IBO bauphysikalisch untersucht. Dabei wurde das Rahmensystem aus Sicht der Verarbeiter so optimiert, dass ein Passivhaus- oder Niedrigenergiestandard erreicht werden kann. Gebäude, die dem Passivhausstandard entsprechen, kommen ohne aktivem Heiz- oder Kühlsystem aus. Um diesen Standard erreichen zu können, ist ein spezifischer Heizwärmebedarf des Gebäudes von unter 15 kWh/m²a vorauszusetzen, was vor allem durch eine gute Wärmedämmung des Gebäudes erzielt werden kann. Laut Wolfgang Feist, Leiter des Passivhaus-Instituts Darmstadt, rentiert sich die Errichtung eines Passivhauses aber erst dann, wenn die Gesamtkosten eines Passivhauses nicht höher sind als die eines gewöhnlichen Neubaus. Durch die Verwendung von Stroh als Dämmstoff und als regional verfügbares Abfallprodukt aus der Getreideerzeugung wird eine besonders günstige Möglichkeit geschaffen, Passivhäuser zu errichten.⁴⁹

⁴⁸ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 72

⁴⁹ GrAT: Wandaufbauten aus nachwachsenden Rohstoffen. Haus der Zukunft. In: URL: <http://www.baubiologie.at/download/hausderzukunft.pdf> (letzter Zugriff: 13.04.2019) S. 101 - 102

Die Studie der GrAT kam dabei mit der Optimierung des Rahmensystems zu folgendem Ergebnis:

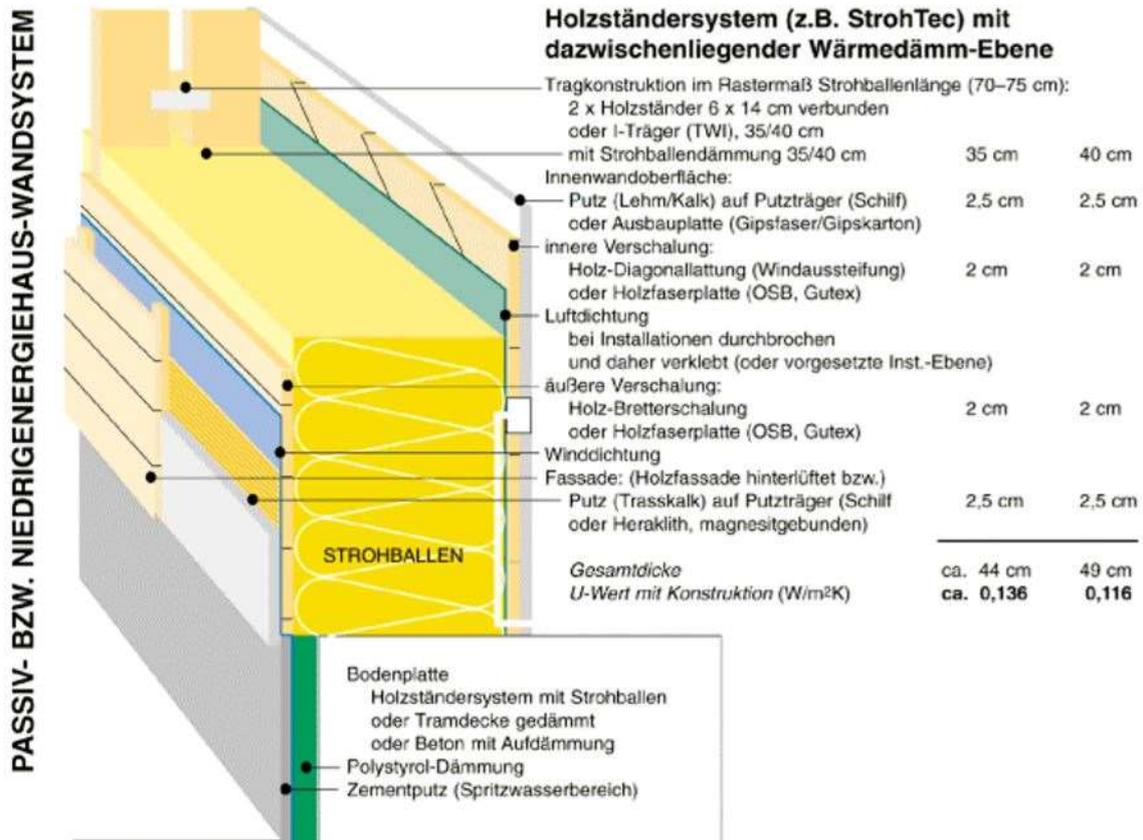


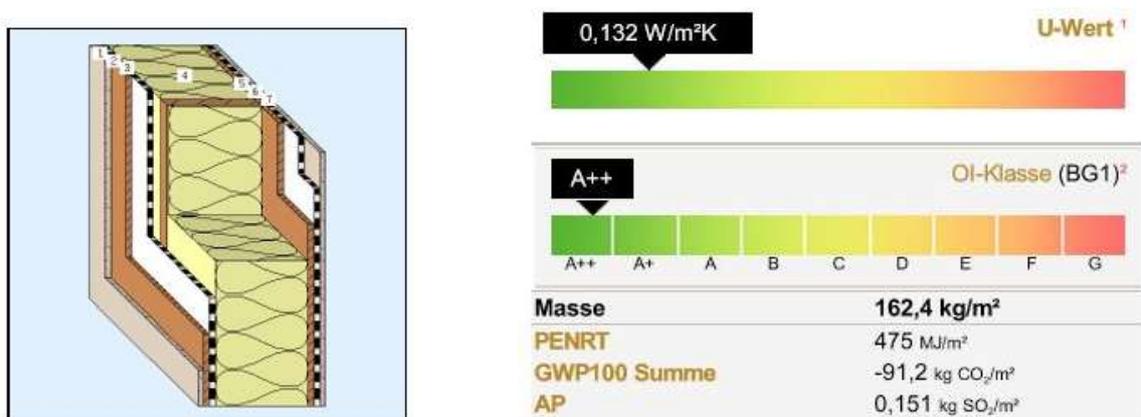
Abbildung 4: Optimierung des Rahmensystems aus bauphysikalischer Sicht

Der optimierte Wandaufbau erreicht also einen U-Wert von bis zu 0,116 W/m²K. Zum Vergleich schreibt die OIB-Richtlinie 6 bei der Errichtung von Neubauten bei konditionierten Räumen gegen Außenluft einen maximalen U-Wert bei Wänden von 0,35 W/m²K vor. Die Grenze des maximal erlaubten Wärmedurchgangskoeffizienten der OIB-Richtlinie wird durch das Rahmensystem mit Strohballendämmung also um das Dreifache unterschritten.⁵⁰

⁵⁰ Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 6. Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-330.6-009/15. März 2015. S.6

6.1.3. bauökologische Detailbetrachtung von Rahmensystemen

Um auch die ökologischen Kennzahlen der Rahmenbauweise nicht außer Acht lassen zu müssen, wurde das in Kapitel 6.1.2 beschriebene optimierte Rahmensystem mit Hilfe des auf der Web-Plattform baubook bereitgestellten Rechners im Zuge dieser Bachelorarbeit auch aus bauökologischer Sicht untersucht. So konnten für den Wandaufbau nun auch zusätzlich die gesamte nicht erneuerbare Primärenergie aus energetisch und stofflich genutzten Ressourcen (PENRT), das gesamte globale Erwärmungspotential (GWP100 Summe) sowie das Versauerungspotential von Boden und Wasser (AP) ermittelt werden. Dabei ist zu erwähnen, dass das Ergebnis von den tatsächlich zu erwartenden Werten abweicht, da die Zwischendämmung aus Kork der Doppelholzständer im Rechentool nicht berücksichtigt werden konnte. Somit sind die Zahlen der Berechnung nur als ungefähre Annäherungswerte anzusehen:



Nr.	Typ	Schicht (von innen nach aussen)	d cm	λ W/mK	R m²K/W	$\Delta OI3$ Pkt/m²
1	Lehmputz		2,50	0,810	0,03	1
2	OSB-Platten (650 kg/m³)		2,00	0,130	0,15	5
3	Baupapier		0,02	0,170	0,00	0
4	Inhomogen (Elemente horizontal)		40,00			
		70 cm (92%) Baustrohballen (109 kg/m³)	40,00	0,051	7,84	-3
		6 cm (8%) KLH®-Massivholzplatte	40,00	0,130	3,08	6
5	OSB-Platten (650 kg/m³)		2,00	0,130	0,15	5
6	Baupapier		0,06	0,170	0,00	0
7	Edelputzmörtel CR Kalk (1500 kg/m³)		2,50	0,670	0,04	6
				$R_{si} / R_{se} =$	0,130 / 0,040	
				R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,4%) =	7,605 / 7,539	
Bauteil			49,083	7,572	21	

Abbildung 5: Rahmensystem aus bauökologischer Sicht

Das Ergebnis der Berechnung zeigt, dass das Rahmensystem die OI-Klasse A++ erreicht hat und somit den bestmöglichen ökologischen Standard erzielt. Als Grundlage für die OI-Klasse eines Bauteils dient der Öko-Indikator eines Quadratmeters einer Konstruktion ($\Delta OI3_{KON}$). Dieser lässt sich aus der Summe der erreichten Punkte der Öko-Indikatoren der einzelnen Bauteilschichten ($\Delta OI3_{BS}$) ermitteln. Der Öko-Indikator einer einzelnen Bauteilschicht ($\Delta OI3_{BS}$) ist ein Summenindikator aus Primärenergieinhalt, Treibhauspotential und Versauerungspotential der einzelnen für den Wandaufbau gewählten Materialien. Die Summe dieser drei Kennzahlen der gewählten Materialien wird in ein Punktesystem umgerechnet. Je höher die erreichten Punkte der Bauteilschicht sind, desto umweltschädlicher ist das Material. Demzufolge sind es vor allem die OSB-Platten, die KLH-Massivholzplatten und der Kalkputz, die den umweltschädlicheren Anteil des Wandaufbaus ausmachen⁵¹

Für die berechnete Konstruktion ergibt sich somit ein PENRT von 475 MJ/m², ein GWP100 Summe von -91,2 kg CO₂/m² und ein AP von 0,151 kg SO₂/m². Der Vergleich mit einem Beispielwandaufbau des baubooks verdeutlicht das Potential der Strohballenkonstruktion. Hier ergeben sich für eine sanierte Hohlziegelmauer gedämmt mit Glaswolle ein PENRT von 1063 MJ/m², ein GWP100 Summe von 67,5 kg CO₂/m² und ein AP von 0,255 kg SO₂/m².⁵²

6.2. Lasttragende Wandkonstruktionen

Bei lastabtragenden Strohballenwänden übernehmen die mit Versatz übereinander gestapelten Strohballen auch statische Funktionen. Die vertikalen Lasten des Daches werden über die Strohballen in das Fundament abgeleitet. Lasttragende Wandkonstruktionen zeichnen sich durch die Einfachheit der Konstruktion und den geringen Materialkosten aus. In diesem Kapitel werden die

⁵¹ Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: http://www.baubook.at/m/Daten/Bilder/Infos/k2_OI3_broschure_anwendung_2017a.pdf (letzter Zugriff: 14.04.2019)

⁵² Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/BTR/?SW=5> (letzter Zugriff: 14.04.2019)

bautechnischen, bauphysikalischen und bauökologischen Aspekte dieser Konstruktion genauer untersucht.⁵³

6.2.1. bautechnische Detailbetrachtung

Eine gute Verdichtung der Strohballen ist bei lastabtragenden Wandkonstruktionen besonders wichtig. Auf den Strohballenwänden ruht ein massiver Ringbalken, der die Lasten gleichmäßig auf die gesamte Wandkonstruktion verteilt. Dieser Ringbalken wird durch Spanngurte oder Spanndrahte so mit dem Fundament verbunden, dass in den Strohballen eine Vorspannung entsteht. Ziel dieser Vorspannung ist es, dass während der Nutzungsphase des Gebäudes keine nachträgliche Setzung mehr stattfinden kann. Eine ältere Technik der Strohballenvorspannung, die heute nicht mehr so oft Anwendung findet ist eine Vorspannung durch Gewindestangen, die durch die Strohballen hindurchverlaufend mit Fundament und Ringbalken verbunden sind:⁵⁴

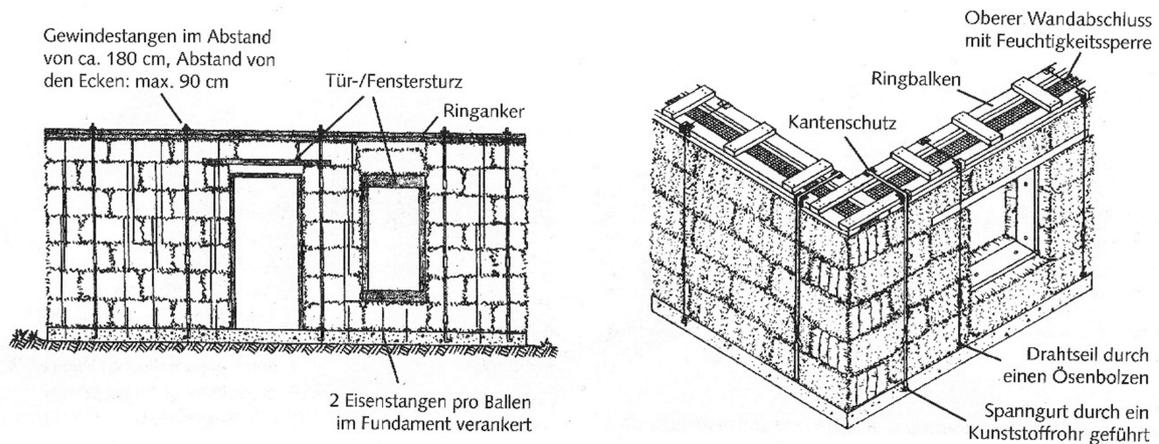


Abbildung 6: Vorspannung mit Gewindestangen und Spanngurten

Nachweise belegen, dass die Putzschichten beim lasttragenden Strohballenbau sowohl zur Ableitung von horizontalen, als auch von vertikalen Kräften beitragen. Für Fenster und Türöffnungen werden Kästen aus Holz in die Wand eingesetzt.

⁵³ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 38

⁵⁴ Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 39

Für die Verbindung der Strohballen mit dem Fundament und dem Ringbalken sorgen Holzspieße oder Armierungsstahl: ⁵⁵

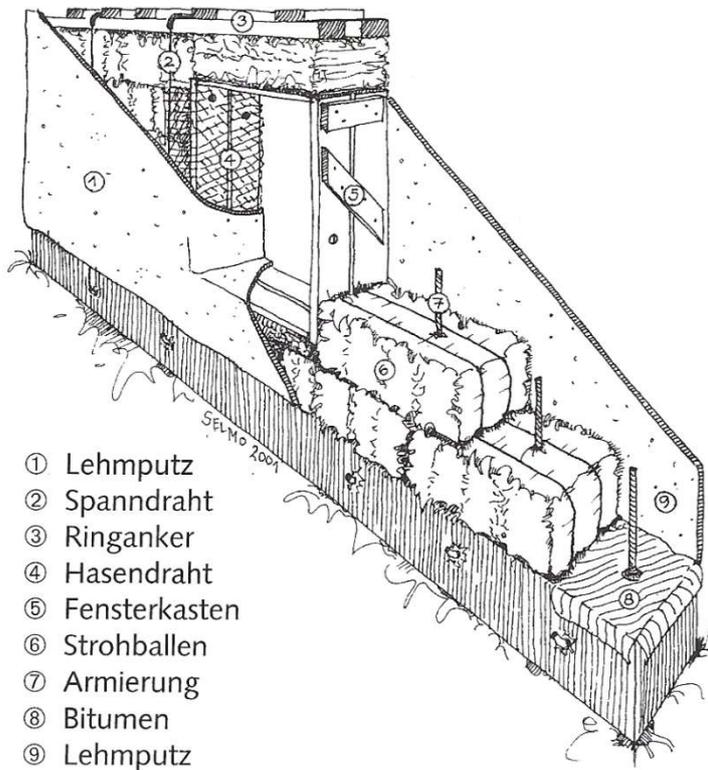


Abbildung 7: Lasttragende Wandkonstruktion

Vorteile von lasttragenden Wandkonstruktionen:⁵⁶

- Im Gegensatz zur Rahmenbauweise besteht kein so großes Wärmebrückenproblem, da eine durchgehende Strohballenschicht vorhanden ist.
- Im Vergleich zur nicht lasttragenden Bauweise wird für die Konstruktion weitaus weniger Holz benötigt, was sich aus ökologischer und finanzieller Sicht positiv auswirkt.

⁵⁵ Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012. S. 56

⁵⁶ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 60

- Die Einfachheit der Konstruktion eignet sich mit der Verwendung von Kleinballen auch zum Selbstbau.

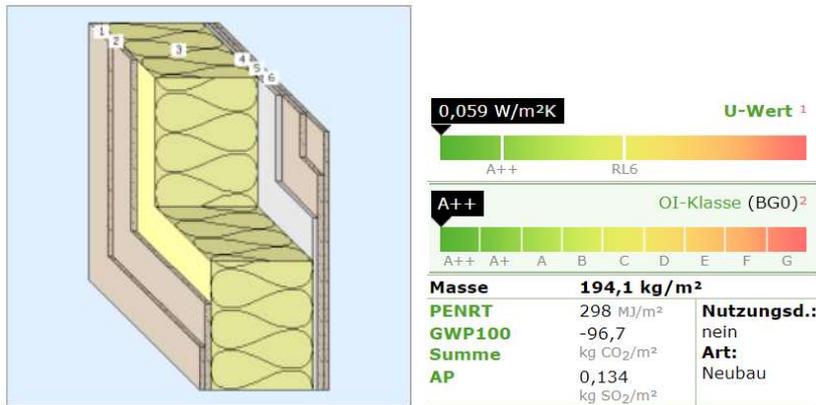
Nachteile von lasttragenden Wandkonstruktionen:

- Im Gegensatz zur Rahmenbauweise, bei der noch vor Einbau der Strohballen das Dach aufgesetzt werden kann, gibt es bei der lasttragenden Strohballenbauweise keinen derartigen Witterungsschutz.
- Des Weiteren ist eine Baugenehmigung bei lastabtragenden Wandaufbauten weitaus schwieriger zu erlangen.

6.2.2. bauphysikalische und bauökologische Detailbetrachtung

Für die bauphysikalische und bauökologische Analyse von lasttragenden Strohballenwänden wird in diesem Kapitel der Wandaufbau eines bereits errichteten Gebäudes untersucht. Dabei handelt es sich um das von der Baumeister Ing. Jürgen Höller GmbH errichtete Musterhaus in Ebergassing. Eine detaillierte Analyse des gesamten Gebäudes erfolgt in Kapitel 7. Bei den für das Gebäude verwendeten Strohballen handelt es sich um zertifizierte Waldland Großballen. Da der Strohballenbau nur zu zwei Drittel über lasttragende Strohballenwände verfügt, kann von einer Hybridbauweise gesprochen werden. Eine genaue Zusammenstellung bauphysikalischer und ökologischer Kennwerte dieser lasttragenden Wandaufbauten konnte dem von der Web-Plattform baubook bereitgestellten Gebäuderechner eco2soft entnommen werden:⁵⁷

⁵⁷ Gruber, Herbert: lasttragendes Strohballenhaus aus Großballen. In: URL: <http://baubiologie.at/strohballenbau/lasttragendes-strohballenhaus-aus-grossballen-3/> (letzter Zugriff: 16.04.2019)



Nr.	Typ	Schicht (von innen nach aussen)	d cm	λ W/mK	R m²K/W	$\Delta OI3$ Pkt/m²
1		Kalkputz	2,00	0,830	0,02	5
2		Kalkputz	2,00	0,830	0,02	5
3		Stroh	85,00	0,051	16,67	-6
4		Armierungsstahl, 208lfm x 10mm	0,01	50,000	0,00	1
5		Kalkputz	1,50	0,830	0,02	4
6		Kalkputz	1,50	0,830	0,02	4
$R_{si} / R_{se} =$					0,130 / 0,040	
R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,0%) =					16,921 / 16,921	
Bauteil			92,008		16,921	12

Abbildung 8: Lasttragende Strohballenwand Musterhaus Ebergassing

Die Darstellung zeigt einen U-Wert des Wandaufbaus von $0,059 \text{ W/m}^2\text{K}$ an, was den U-Wert des optimierten Rahmensystems aus Kapitel 6.1.2 um mehr als das Doppelte unterschreitet. Der lt. OIB-Richtlinie 6 erlaubte maximale U-Wert von $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird sogar fast um den sechsfachen Wert unterschritten. Die Wärmedämmeigenschaften der lasttragenden Wandkonstruktion sind also besonders gut, was der durchgehenden Strohballendämmung zuzuschreiben ist.

Genau so wie bei der nicht lasttragenden Variante wird eine OI-Klasse von A++ erricht, was ebenfalls dem bestmöglichen ökologischen Standard entspricht. Die umweltschädlichsten Anteile der Konstruktion sind lt. dem Punktesystem der Öko-Indikatoren der einzelnen Bauteilschichten ($\Delta OI3_{BS}$) lediglich dem Kalkputz zuzuschreiben.

Der geringe Holzanteil und der hohe Strohanteil der Konstruktion ermöglicht verglichen mit der in Kapitel 6.1.3 durchgerechneten nicht lasttragenden Variante auch bessere Werte bei den ökologischen Kennwerten. So wird ein PENRT von 298 MJ/m^2 , ein GWP100 Summe von $-96,7 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ und ein AP von $0,134 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ erreicht.

7. Best Practice Beispiel Strohballehaus Ebergassing

Als Best Practice Beispiel für ein Gebäude in Strohballebauweise wird in diesem Kapitel ein Passivhaus der Firma Höller GmbH vorgestellt. Das als Bürogebäude genutzte Bauwerk in Hybridbauweise befindet sich in Ebergassing (NÖ):



Abbildung 9: Strohballehaus Ebergassing

Tabelle 7: Gebäudedaten Strohballehaus Ebergassing

Errichtung	2013
Geschosse	2
Nutzfläche	247 m ²
bebaute Fläche	181,37 m ²
Heizwärmebedarf	10 kWh/m ² a
U-Werte	
Außenwand lasttragende Strohballe	0,09 W/m ² K
Außenwand Holzständer	0,11 W/m ² K
Bodenplatte	0,10 W/m ² K
Flachdach	0,13 W/m ² K
Gebäudetechnik	
Raumheizung und Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe
Photovoltaiksystem	80 m ² / 14,4 kWp
Lüftungsanlage	Lüftung mit Wärmerückgewinnung

7.1.1. architektonisches Konzept und Konstruktion

Ziel der Errichtung dieses Gebäudes war es ein Passivhaus zu schaffen, das die gleichen Baukosten wie bei dem Erbau eines Passivhauses in Massivbauweise aufweist und dabei weitaus bessere ökologische Eigenschaften erzielt. So ist beispielsweise die Entsorgung von Stroh um ein Vielfaches unproblematischer, als die Entsorgung der Materialien, die beim Rückbau eines Massivhauses anfallen. Das Strohballenhaus in Ebergassing kann als Hybridbau bezeichnet werden, da es sich nicht um einen vollständigen lasttragenden Strohballenbau handelt. Lasttragende Wandkonstruktionen mit 85 cm breiten Großballen und ca. 3 bis 4 cm dickem Außen- und Innenputz wurden vor allem dort eingesetzt, wo keine großen Fensterflächen vorgesehen sind. Für die großen Fensteröffnungen in der Südwestfassade des Gebäudes musste eine mit Kleinballen gedämmte Holzständerkonstruktion herangezogen werden. Somit besteht das Passivhaus aus zwei Drittel lasttragenden Strohballenwänden mit einer Gesamtdicke von 90 cm und zu einem Drittel aus Holzständerwänden mit einer Gesamtdicke von 54 cm. Der Grundriss verdeutlicht das Zusammenspiel dieser zwei Wandsysteme: ⁵⁸



Abbildung 10: Grundriss Erdgeschoss und Obergeschoss Strohballenhaus Ebergassing

Die Erschließung der Geschosse kann über das Gebäudeinnere oder außen über den Balkon erfolgen. Die nach Südwesten orientierte mit großen Fensterflächen

⁵⁸ Höller, Jürgen/Bintinger Rudolf/Steiner, Tobias: Lasttragender Strohballenbau. In: IBO-Magazin. Nr.4. Wien 2013. S.12-14

versehene Holzständerfassade soll in Kombination mit den speicherwirksamen lasttragenden Strohballenwänden im Nordosten für genügend passive solare Erträge durch die tiefstehende Wintersonne sorgen. Ein auskragender Balkon sowie das 260 cm überstehende Flachdach über diesen Balkon an der Südwestfassade sorgen für ausreichend Beschattung in den Sommermonaten und schützen vor Überhitzung: ⁵⁹

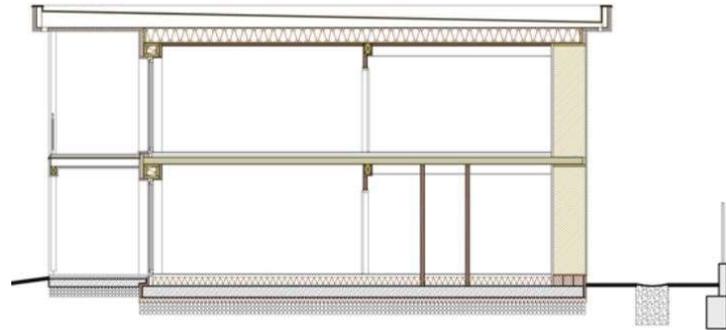


Abbildung 11: Schnitt Strohballenhaus Ebergassing

Die Gebäudetechnik umfasst eine 80 m² Photovoltaikanlage, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, sowie eine Sole/Wasser-Wärmepumpe für die Bereitstellung des Warmwassers sowie für die Heizung des Gebäudes. ⁶⁰

7.1.2. Aufbauen inkl. bauphysikalischer und bauökologischer Kennzahlen

In diesem Kapitel werden die Aufbauten der einzelnen Bauteile des Strohballenhauses in Ebergassing in Anbetracht ihrer bauphysikalischen und bauökologischen Eigenschaften genauer untersucht.

Grundsätzlich werden bei dem Bürogebäude zwei Wandsysteme unterschieden: Lasttragende Strohballenwände zu zwei Drittel der Gesamtkonstruktion und Holzständerwände zu einem Drittel der Gesamtkonstruktion, bei denen die Strohballen nur als reine Wärmedämmung dienen. 208 m² Wandfläche umfassen

⁵⁹ Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 97-98

⁶⁰ Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 19.04.2019)

dabei lasttragende Strohballenwände. Diese erstrecken sich über die Nordwest-, Nordost-, und Südostfassade:⁶¹



Abbildung 12: Lasttragende Strohballenwand Ebergassing

Die Grafik des Bauteilrechners baubook zeigt einen erreichten U-Wert des lasttragenden Wandaufbaus von $0,059 \text{ W/m}^2\text{K}$, was den lt. OIB-Richtlinie 6 erlaubten maximalen U-Wert von $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ um ein Vielfaches unterschreitet. Das Stroh als CO_2 -Speicher entlastet bei einem Quadratmeter dieses Wandaufbaus bemessen auf einen Zeitraum von 100 Jahren die Atmosphäre mit $96,7 \text{ kg CO}_2$. Des Weiteren wurde ein Verauerungspotential von $0,134 \text{ kg SO}_2/\text{m}^2$ und ein Primärenergieinhalt von 298 MJ/m^2 für diesen Wandaufbau errechnet.

Die sich über die Südwestfassade erstreckende Holzständerfassade umfasst $99,2 \text{ m}^2$ Wandfläche und erzielt keine so guten bauphysikalischen und ökologischen Werte wie die der lasttragenden Konstruktion. Verglichen mit anderen Bauweisen, wie eine Gegenüberstellung eines nicht lasttragenden Wandsystems mit einer

⁶¹ Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 20.04.2019)

Massivwand in Kapitel 6.1.3 verdeutlicht, sind die Kennzahlen der Holzständerfassade aber trotzdem noch sehr gut:

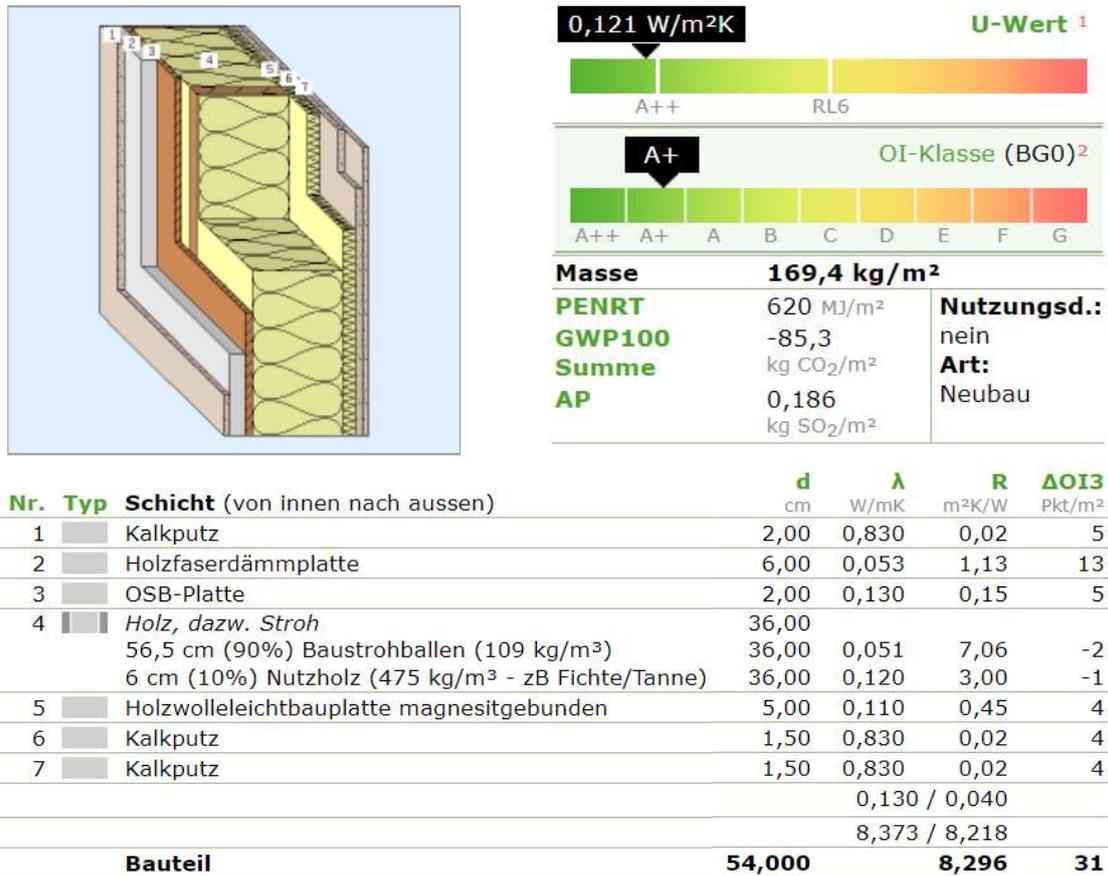


Abbildung 13: Holzständerwand mit Strohdämmung Ebergassing

Bei der Holzständerwand ergibt sich mit $0,121 \text{ W/m}^2\text{K}$ ein doppelt so hoher U-Wert, wie bei der lasttragenden Strohballewand. Auch der Wert für den Primärenergieinhalt ist mit 620 MJ/m^2 mehr als doppelt so hoch. Die Holzständerwand entlastet die Atmosphäre um ca. 10 kg CO_2 pro Quadratmeter Wandfläche weniger, als es bei der lasttragenden Variante der Fall ist. Auch bei der Herstellung eines Quadratmeters dieses Wandaufbaus wird um ca. $0,050 \text{ kg}$ mehr säurebildendes Schwefeldioxidgas freigesetzt als bei der lasttragenden Strohballewand.

Auch in der Dachkonstruktion des Gebäudes kommt Stroh zum Einsatz. Das Dach wurde als Flachdach ausgebildet:

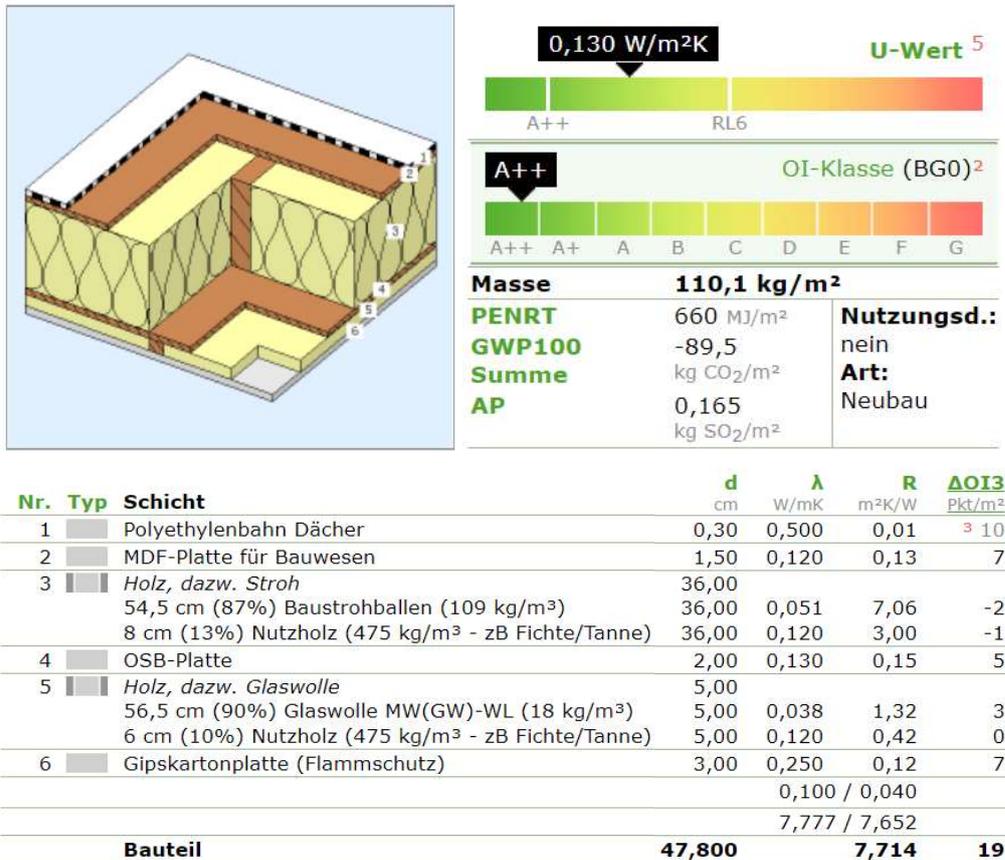
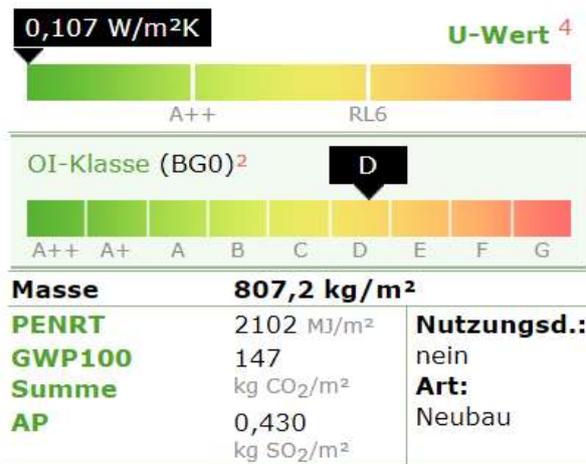
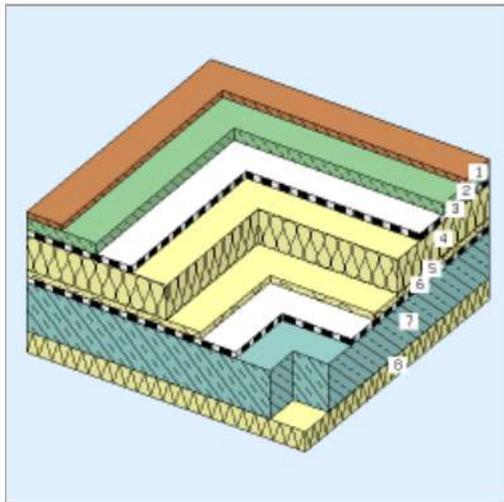


Abbildung 14: Dachkonstruktion Ebergassing

Das Flachdach erreicht einen U-Wert von 0,13 W/m²K. Der lt. der OIB-Richtlinie 6 vorgegebene maximale Wert von 0,2 W/m²K für Decken gegen Außenluft wird auch hier weit unterschritten. Der Primärenergieinhalt beträgt 660 MJ/m², das Treibhauspotential -89,5 kg CO₂/m² und das Versauerungspotential 0,165 kg SO₂/m². Damit erreicht das Dach die bestmögliche OI-Klasse von A++.

Da an Bodenplatten für Gebäude vor allem besondere statische und feuchtetechnische Anforderungen gestellt werden müssen, können nur Baustoffe eingesetzt werden, die nicht nur eine entsprechend gute Festigkeit aufweisen, sondern auch eine entsprechende Widerstandsfähigkeit gegen die Einflüsse des angrenzenden Bodens aufweisen. Für das Strohballenhaus in Ebergassing kam für die Bodenplatte folgende Konstruktion zum Einsatz: ⁶²

⁶² Pech, Anton: Baukonstruktionen. Keller. Wien: fh-campus wien. Skriptum. SS 2018. S.7



Nr.	Typ	Schicht	d cm	λ W/mK	R m ² K/W	ΔOI3 Pkt/m ²
1		Massivparkett	1,00	0,160	0,06	³ 10
2		Estrichbeton	6,50	1,600	0,04	12
3		Dampfbremse PE	0,04	0,500	0,00	³ 1
4		Polystyrol expandiert (EPS)-W20	20,00	0,038	5,26	23
5		Polystyrol expandiert Granulat zementgebunden	4,00	0,075	0,53	4
6		Polymerbitumen-Dichtungsbahn	0,50	0,230	0,02	³ 12
7		Stahlbeton	28,00	2,300	0,12	68
8		Polystyrol extrudiert CO ₂ -geschäumt	12,00	0,038	3,16	21
					0,170 / 0,000	
					9,372 / 9,372	
Bauteil			72,040		9,372	129

Abbildung 15: Bodenplatte Ebergassing

Für die Bodenplatte ergibt sich ein U-Wert von 0,107 W/m²K. Die OIB-Richtlinie 6 schreibt für erdberührende Böden einen maximalen U-Wert von 0,4 W/m²K vor. Aus bauphysikalischer Sicht ist der Aufbau dieser Bodenplatte also sehr gut. Als Folge der besonderen Anforderungen, die an Bodenplatten gestellt werden müssen, konnten nur Baustoffe zum Einsatz kommen, die keine sehr guten ökologischen Eigenschaften aufweisen. Daraus resultiert ein Primärinhalt von 2102 MJ/m², ein Treibhauspotential von 147 kg CO₂/m² und ein Versauerungspotential von 0,430 kg SO₂/m². In Summe erreicht der Aufbau die OI-Klasse D.

7.1.3. Ökobilanz des gesamten Gebäudes⁶³

Eine ökologische Bewertung des gesamten Gebäudes erfolgte durch das österreichische Institut für Bauen und Ökologie (IBO). Bei dieser Bewertung wurde die Gebäudeerrichtung, die Erneuerung des Gebäudes sowie die Entsorgung des Gebäudes berücksichtigt. Ermittelt wurde dabei der Primärenergieinhalt aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PEine), das Treibhauspotential (GWP), sowie das Versauerungspotential (AP). Die Nutzungsdauer für das Gebäude wurde dabei mit 100 Jahren angenommen. Da nicht alle Bestandteile des Gebäudes so langlebig sind, wurde für manche Bauteile eine kürzere Nutzungsdauer angesetzt. Der Austausch dieser Bauteile nach ihrer jeweiligen Nutzungsdauer wird in der Ökobilanz mit der Erneuerung des Gebäudes berücksichtigt. Die ökologische Bewertung erbrachte dabei folgendes Ergebnis:

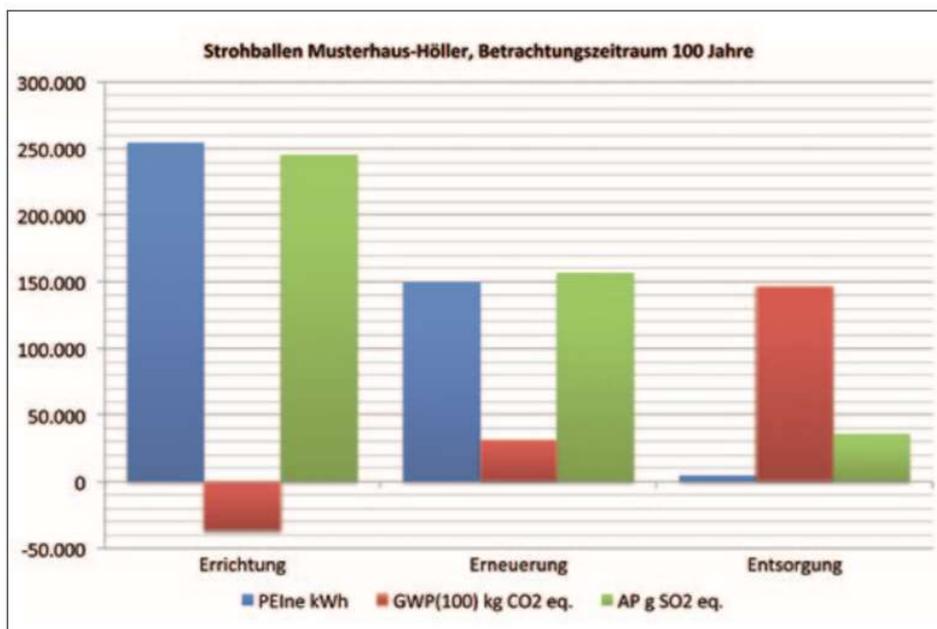


Abbildung 16: ökologische Kennzahlen der Errichtung, Erneuerung und Entsorgung

Bei der Errichtung des Strohballenhauses wird ein Primärenergieinhalt von ca. 255.000 kWh errechnet. Das in nachwachsenden Baumaterialien wie Stroh gespeicherte CO₂ führt zu einem negativen Treibhauspotential von ca. -40 t CO₂ eq. Des Weiteren trägt die Errichtung des Gebäudes zur Versauerung von Böden und Gewässern mit der Freisetzung von ca. 245 kg SO₂ eq bei.

⁶³ Höllner, Jürgen: Lasttragender Strohballenbau. In: IBO Magazin. Wien. Nr. 4 aus 2013. S.12-13

Da beim Rückbau des Gebäudes eine thermische Verwertung der erneuerbaren Baustoffe angenommen wird, fällt mit der Entsorgung aller anderen nicht erneuerbaren Stoffe des Gebäudes ein Treibhauspotential von ca. 145 t CO₂ eq an. Die Werte des Primärenergieinhalts und des Versauerungspotentials sind bei der Entsorgung dabei vergleichen mit den Werten der Errichtung besonders gering.

Im Zuge der ökologischen Bewertung des Strohballenhauses in Ebergassing erfolgte auch der Vergleich mit einem Massivbau mit EPS-Vollwärmeschutz. Dabei wurde wieder der gesamte Lebenszyklus der Gebäude berücksichtigt:

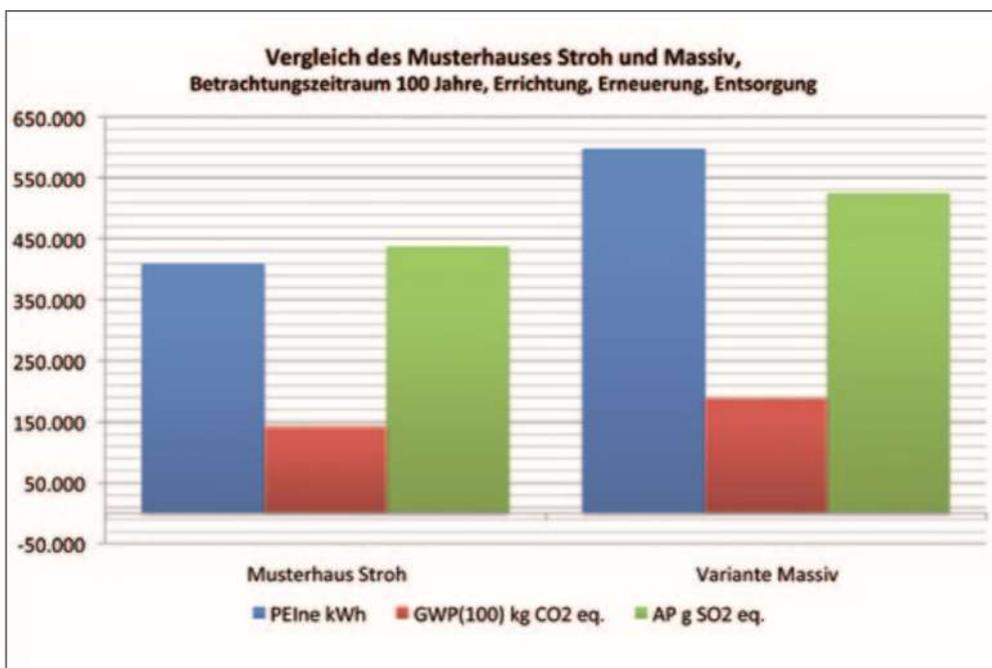


Abbildung 17: Vergleich Strohballenbau mit Massivbau

Der den gesamten Lebenszyklus der Gebäude umfassende Vergleich zeigt, dass das Gebäude in Strohballenbauweise weitaus umweltschonender ist als es eine massive Bauweise wäre. So wird für das Strohballenhaus um ca. 200.000 kWh weniger Primärenergie aus nicht erneuerbaren Ressourcen benötigt und es erfolgt eine Einsparung ca. 50 t CO₂ und ca. 120 kg SO₂.

8. Ergebnis der Arbeit und Schlussfolgerung

Stroh ist lokal vorhanden, fällt als Nebenprodukt bei der Herstellung von Getreide an und führt zu keinem Entsorgungsproblem. Außerdem wird, verglichen mit herkömmlichen Baustoffen, nur wenig Energie für die Herstellung von Stroh benötigt. Darüber hinaus bindet das Ausgangsprodukt Getreide bei der Photosynthese CO₂, das auch noch während der Verwendung des Strohs als Baustoff in seiner Struktur gebunden bleibt.

Somit trägt die Verwendung von Stroh als kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Baustoffen zur Reduktion der Treibhausgase, des Primärenergiebedarfs und des Versauerungspotentials bei und damit auch zum Klimaschutz.

Neben den vielen ökologischen Vorteilen von Stroh kann auch gesagt werden, dass Stroh bei richtiger Verwendung auch aus bauphysikalischer und bautechnischer Sicht anderen Baustoffen in nichts nachsteht.

Es ist also durchaus sinnvoll, dass das Baumaterial Stroh wieder vermehrt in der Baubranche zum Einsatz kommt. Eine umfassende Zertifizierung von Baustrohballen kann dazu führen, dass sich der Strohhallenbau und damit eine umweltschonende Bauweise wieder besser in der Baubranche etablieren kann und sich im Endeffekt wieder mehr verbreitet.

Quellenverzeichnis

Fachbücher

Gruber, Herbert/ Gruber, Astrid/ Santler, Helmuth: **Neues Bauen mit Stroh in Europa**. 4., völlig überarbeitete und ergänzte Auflage 2012. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2012.

Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: **Handbuch Strohballenbau**. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014.

Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: **Der Strohballenbau**. Ein Konstruktionshandbuch. 1. Auflage 2004. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2004.

Riccabona, Christof/ Bednar, Thomas: **Baukonstruktionslehre 4**. Bauphysik. 9. überarbeitete Auflage 2013. Wien: Manz Verlag 2013.

Aufsätze aus Zeitschriften

Höllner, Jürgen/Bintinger Rudolf/Steiner, Tobias: **Lasttragender Strohballenbau**. In: IBO-Magazin. Nr.4. Wien 2013.

Richtlinien

Österreichisches Institut für Bautechnik: **OIB-Richtlinie. Begriffsbestimmungen**. Oktober 2011.

Österreichisches Institut für Bautechnik: **OIB-Richtlinie 2**. Brandschutz. OIB-330.2-011/15. März 2015.

Österreichisches Institut für Bautechnik: **OIB-Richtlinie 5**. Schallschutz. OIB-330.5-002/15. März 2015.

Österreichisches Institut für Bautechnik: **OIB-Richtlinie 6**. Energieeinsparung und Wärmeschutz. OIB-330.6-009/15. März 2015.

Zulassungen

Österreichisches Institut für Bautechnik: **Europäische Technische Zulassung** ETA-10/0032. 03.06.2013.

Diplomarbeit

Verhoeven, Pascal: **Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen**. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017.

Skripten

Pech, Anton: **Baukonstruktionen. Bauphysik**. Wien: fh-campus wien. Skriptum. WS 2017/18.

Pech, Anton: **Baukonstruktionen. Keller**. Wien: fh-campus wien. Skriptum. SS 2018.

Internet

Baubook GmbH: **Baubook Rechner für Bauteile**. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 20.04.2019)

Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.: **Strohbaurichtlinie 2014**. In URL: <http://fasba.de/wp-content/uploads/2016/05/SBR-2014-11-22-end.pdf> (letzter Zugriff: 02.04.2019)

GrAT: **Wandaufbauten aus nachwachsenden Rohstoffen**. Haus der Zukunft. In: URL: <http://www.baubiologie.at/download/hausderzukunft.pdf> (letzter Zugriff: 13.04.2019)

Gruber, Herbert: **lasttragendes Strohballenhaus aus Großballen**. In: URL: <http://baubiologie.at/strohballenbau/lasttragendes-strohballenhaus-aus-grossballen-3/> (letzter Zugriff: 16.04.2019)

Magazin für gesundes Wohnen und Bauen: **Baustoffkatalog**. In URL: <https://www.ib-rauch.de/okbau/stoffwert/suchen01.php> (letzter Zugriff: 09.04.2019)

Universität Duisburg-Essen: **Bauphysik-Interaktiv**. In URL: https://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_fe_wasserauf1.htm (letzter Zugriff: 09.04.2019)

Westermann, Stephan: **Bauökologie**. In: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/b/bauoekologie-1547119> (letzter Zugriff: 04.04.2019)

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: lasttragende Strohballenwand 3
 Quelle: Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 37
- Abbildung 2: nicht lasttragende Strohballenwand.....3
 Quelle: Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 37
- Abbildung 3: Rahmensystem.....24
 Quelle: Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. 1. Auflage 2004. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2004. S. 18
- Abbildung 4: Optimierung des Rahmensystems aus bauphysikalischer Sicht.....26
 Quelle: GrAT: Wandaufbauten aus nachwachsenden Rohstoffen. Haus der Zukunft. In: URL: <http://www.baubiologie.at/download/hausderzukunft.pdf> (letzter Zugriff: 13.04.2019) S. 102
- Abbildung 5: Rahmensystem aus bauökologischer Sicht.....27
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/BTR/?SW=5&LU=1823781209&qj=3&LP=wzO44> (letzter Zugriff: 14.04.2019)
- Abbildung 6: Vorspannung mit Gewindestangen und Spanngurten.....29
 Quelle: Minke, Gernot/ Krick, Benjamin: Handbuch Strohballenbau. Grundlagen, Konstruktion, Beispiele. 3. Erweiterte und aktualisierte Auflage 2014. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2014. S. 38
- Abbildung 7: lasttragende Wandkonstruktion.....30
 Quelle: Quelle: Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. 1. Auflage 2004. Staufen bei Freiburg: ökobuch Verlag 2004. S. 18

- Abbildung 8: lasttragende Strohballenwand Musterhaus Ebergassing.....32
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/?SW=27&LU=1823781209&qJ=1&LP=WZU4Y> (letzter Zugriff: 16.04.2019)
- Abbildung 9: Strohballenhaus Ebergassing.....33
 Quelle: Gruber, Herbert: lasttragendes Strohballenhaus aus Großballen. In URL: <http://baubiologie.at/strohballenbau/lasttragendes-strohballenhaus-aus-grossballen-3/> (letzter Zugriff: 18.04.2019)
- Abbildung 10: Grundriss Erdgeschoss und Obergeschoss Strohballenhaus Ebergassing.....34
 Quelle: Strohplus GmbH: Musterhaus. In URL: <http://www.strohplus.at/musterhaus.html> (letzter Zugriff: 19.04.2019)
- Abbildung 11: Schnitt Strohballenhaus Ebergassing.....35
 Quelle: Strohplus GmbH: Musterhaus. In URL: <http://www.strohplus.at/musterhaus.html> (letzter Zugriff: 19.04.2019)
- Abbildung 12: lasttragende Strohballenwand Ebergassing.....36
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 20.04.2019)
- Abbildung 13: Holzständerwand mit Strohdämmung Ebergassing.....37
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 20.04.2019)
- Abbildung 14: Dachkonstruktion Ebergassing.....38
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 22.04.2019)
- Abbildung 15: Bodenplatte Ebergassing.....39
 Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: <https://www.baubook.info/eco2soft/> (letzter Zugriff: 22.04.2019)
- Abbildung 16: ökologische Kennzahlen der Errichtung, Erneuerung und Entsorgung.....40
 Quelle: Höller, Jürgen: Lasttragender Strohballenbau. In: IBO Magazin. Wien. Nr. 4 aus 2013. S.13

Abbildung 17: Vergleich Strohballenbau mit Massivbau.....41
Quelle: Höller, Jürgen: Lasttragender Strohballenbau. In: IBO Magazin. Wien. Nr. 4 aus 2013. S.13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Formate von Waldland Baustrohballen.....	15
Quelle: Österreichisches Institut für Bautechnik: Europäische Technische Zulassung ETA-10/0032. 03.06.2013.	
Tabelle 2: Formate von S-House Ballen.....	16
Quelle: Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 14	
Tabelle 3: Formate von Baustroh.....	16
Quelle: Verhoeven, Pascal: Strohballenbau: Stand von Wissenschaft und Technik und Untersuchung der Anwendung im energiesparenden und ökologischen Bauen. FH Campus Wien. Diplomarbeit 2017. S. 16	
Tabelle 4: Primärenergieinhalt von Strohballen verglichen mit anderen Dämmstoffen.....	18
Quelle: Krick, Benjamin: Primärenergieinhalte von Strohballen und Strohballenkonstruktionen. Kassel: Universität, Fachbereich Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung. Diss. 2005.	
Tabelle 5: Globales Erwärmungspotential von Stroh verglichen mit anderen Dämmstoffen.....	19
Quelle: IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie: Dämmstoffe. in: URL: https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/daemmstoffe2013.pdf (letzter Zugriff: 05.04.2019)	
Tabelle 6: Versauerungspotential von Stroh vergleichen mit anderen Dämmstoffen.....	20
Quelle: IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie: Dämmstoffe. in: URL: https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/materialoekologie/daemmstoffe2013.pdf (letzter Zugriff: 06.04.2019)	
Tabelle 7: Gebäudedaten Strohballenhaus Ebergassing.....	33
Quelle: Baubook GmbH: Baubook Rechner für Bauteile. In URL: https://www.baubook.info/eco2soft/ (letzter Zugriff: 18.04.2019)	