

Die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial

Wie groß ist die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial und wie kann sie vergrößert werden?

The lifespan of straw as a construction material

How big is the lifespan of straw as a construction material and how can it be maximized?

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering (BSc)

der Fachhochschule FH Campus Wien
Bachelorstudiengang: Architektur – Green Building

Vorgelegt von:
Michael Günther

Personenkennzeichen
1810733019, 51840759

Erstbegutachter:
DI Tobias Steiner

Eingereicht am:
15.08.2020

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:

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich in diesem Studium und im Laufe dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt dabei Wilhelm Höfler, der mich mit seiner Begeisterung für die ökologische Baukunst maßgebend zu diesem Studium inspiriert hat.

Weiterer Dank gebührt meinem Bruder Theodor Günther, der mir in einer Diskussion die Frage gestellt hat, wie lange denn Stroh eigentlich hält und mich so zu dieser Arbeit inspiriert hat.

Besonders möchte ich mich auch bei meiner Freundin Nicole Schäbinger bedanken, die mich nicht nur während des Studiums so großartig unterstützt und mir immer alles abnimmt, wenn mal wieder Entwerfen-Zeit ist.

Außerdem möchte ich mich bei meinem Betreuer Tobias Steiner bedanken, der mir im Laufe dieser Arbeit immer mit Rat und Tat zur Seite stand und trotz Corona-Stress alle E-Mails in Windeseile beantwortet hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei allen Autoren und Autorinnen bedanken, die so großartige Arbeiten zum Thema Strohbau gemachten haben.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird versucht, die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial zu erörtern. Dazu wird eine Methode entwickelt, mit der der Zerfall von Stroh bestimmt werden kann.

Konkret werden drei gängige Wandaufbauten mit Stroh verglichen. Nach der Bestimmung der Nutzungsdauer wird weiter erörtert, wie diese verlängert werden kann.

Wie lange Stroh als Baumaterial nutzbar ist, hängt von dem Feuchtegehalt im Stroh ab. Dieser Feuchtegehalt kann das Wachstum von Schimmelpilzen und Bakterien sowie einen anaeroben Zerfall auslösen. Um herauszufinden ob ein Zerfall stattfindet und mit welcher Geschwindigkeit dieser voranschreitet, werden mit dem Programm Delphin 6 von Bauklimatik Dresden hygrothermische Simulationen durchgeführt. Mit diesem Programm kann das Schimmelpilzwachstum sowie der Gehalt der relativen Luftfeuchtigkeit im Stroh simuliert werden. Mit den Daten der relativen Luftfeuchtigkeit kann der Zerfall des Strohs und damit direkt die Lebensdauer des Baumaterials berechnet werden.

Um Stroh nachhaltig als Baumaterial verwenden zu können, muss es eine Lebensdauer von 50 Jahren für normale Gebäude und 100 Jahren für monumentale Gebäude aufweisen.

Alle in dieser Arbeit betrachteten Wandaufbauten sind geeignet, eine Lebensdauer von deutlich über 100 Jahren zu erreichen.

Abstract

This paper aims to discuss the life span of straw as a building material. For this purpose, a method is developed to determine the decay of straw.

Concretely, three common wall constructions with straw are compared. After determining the useful lifespan, it is further discussed how the lifespan can be extended.

How long straw can be used as a building material depends on the moisture content in the straw. This moisture content can trigger the growth of mould and bacteria and anaerobic decay. In order to find out whether decay is taking place and at what rate it is progressing, hygrothermal simulations are carried out with the program Delphin 6 from Bauklimatik Dresden. This program can be used to simulate mould growth and the relative humidity content of the straw. With the data of the relative humidity the decay of the straw and thus directly the life span of the building material can be computed.

In order to be able to use straw sustainably as a building material, it must have a lifespan of 50 years for normal buildings and 100 years for monumental buildings.

All wall structures considered in this work are suitable for achieving a service life of well over 100 years.

Abkürzungsverzeichnis

KLH Kreuzlagenholz

Schlüsselbegriffe

Stroh	Straw
Strohbau	Building with Straw
Lebensdauerberechnung	Calculation of life span
Lebensdauer von Stroh	Life span of straw
Baumaterial	Building material

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	I
KURZFASSUNG	II
ABSTRACT.....	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
SCHLÜSSELBEGRIFFE	V
INHALTSVERZEICHNIS.....	VI
1. WARUM MIT STROH BAUEN.....	1
2. RELEVANZ DER FRAGESTELLUNG.....	2
3. WANDKONSTRUKTIONEN MIT STROH.....	3
3.1. Lasttragende Strohballensysteme	3
3.2. Nicht lasttragende Systeme mit Holzkonstruktion.....	6
3.2.1. Vollholzwand mit Strohdämmung außen	6
3.2.2. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion.....	7
4. DEFINITION DER RANDBEDINGUNGEN	9
5. EINFLÜSSE AUF DIE LEBENSDAUER VON STROH.....	10
5.1. Ungeziefer.....	10
5.2. Feuchtigkeit.....	10
5.3. Zersetzung durch Mikroorganismen.....	14
5.4. Schimmel	17
6. DIE LEBENSDAUER EINES BAUTEILS.....	21
7. METHODE	22
7.1. Berechnung der Strohschichtdicke.....	24
7.1.1. Lasttragende Strohballenwand	25
7.1.2. Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	26
7.1.3. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion.....	27
8. SIMULATIONEN MIT DELPHIN 6	31
8.1. Lasttragende Strohballenwand	31
8.1.1. Isoplethenmodell	32
8.1.2. VTT-Schimmelmodell.....	34
8.1.3. Berechnung des Zerfalls	35
8.1.4. Berechnung der Lebensdauer	35
8.1.5. Verbesserung des Wandaufbaus.....	36
8.2. Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene	38

8.2.1.	Isoplethenmodell	39
8.2.2.	VTT-Schimmelmodell.....	41
8.2.3.	Berechnung des Zerfalls	42
8.2.4.	Berechnung der Lebensdauer	43
8.2.5.	Verbesserung des Wandaufbaus.....	44
8.3.	Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion	45
8.3.1.	Isoplethenmodell	46
8.3.2.	VTT-Schimmelmodell.....	48
8.3.3.	Berechnung des Zerfalls	49
8.3.4.	Berechnung der Lebensdauer	50
8.3.5.	Verbesserung des Wandaufbaus.....	51
9.	DISKUSSION.....	52
10.	CONCLUSIO	53
	QUELLENVERZEICHNIS	54
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	56
	TABELLENVERZEICHNIS.....	57
	ANHANG.....	58

1. Warum mit Stroh bauen

Als Stroh bezeichnet man die getrockneten Halme von grasartigen Pflanzen. Es ist ein Abfallprodukt des Getreideanbaus und dadurch in großen Mengen vorhanden. Stroh verfügt über hervorragende wärmedämmende Eigenschaften, die sich aus den vielen Lufteinschlüssen in den hohlen Halmen ergeben. Dank ihrer hydrophoben Oberfläche werden Strohhalme seit jeher für Dächer verwendet.

Die Bauindustrie ist einer der größten Rohstoffsenken der Welt.¹ Herkömmliche Baumaterialien wie Beton, Ziegeln oder Polystyrol sind nicht nachwachsend und benötigen große Mengen an Energie in Produktion und Transport, was sich auch in deren CO₂-Billanz niederschlägt. Stroh dagegen nimmt während seines Wachstums CO₂ auf und ist fast überall auf der Welt kostengünstig verfügbar.

¹ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.6f.

2. Relevanz der Fragestellung

Stroh ist wie im ersten Kapitel bereits erwähnt ein innovatives Baumaterial. Jedoch gibt es kaum Quellen über die Lebensdauer von Stroh. Normale Gebäude sind auf eine Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von 50 Jahren nachzuweisen. Monumentale Bauwerke sind auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren auszulegen.²

Um Stroh als brauchbares Baumaterial zu betrachten ist daher ein Nachweis für eine Lebensdauer von mindestens 50 bzw. 100 Jahren zu erbringen.

Die dünne Datenlage zur Lebensdauer von Stroh als Baumaterial hängt wahrscheinlich mit der jungen Geschichte des Strohballenbaus zusammen. Erst mit der Erfindung der Strohballenpressen im 19. Jh. haben Menschen begonnen aus eben diesen Ballen Häuser zu bauen. Als Armierung von Lehm oder als Deckungsmaterial für Dächer hingegen ist Stroh schon seit jeher als Baumaterial im Einsatz. Das älteste noch stehende Strohballenhaus der Welt ist das 1903 erbaute Burk-Haus in Nebraska.³ Die Frage nach der Lebensdauer von Strohballen als Baumaterial lässt sich also bereits an dieser Stelle mit mindestens 100 Jahren beantworten. Jedoch sind viele Faktoren für die Langlebigkeit eines Strohhauses entscheidend. Welche Faktoren das sind und wie sie sich auf das Stroh auswirken soll in dieser Arbeit erörtert werden. Um die Frage der Lebensdauer ausführlicher beantworten zu können wird mittels hygrothermischer Simulationen ein Blick in die Zukunft geworfen.

² Pech, Anton: BK020 Tragwerke 20180907 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2019/20. S.49.

³ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.10f.

3. Wandkonstruktionen mit Stroh

Wenn man von Strohbau spricht, unterscheidet man grundsätzlich zwei Bauweisen, nämlich den lasttragenden Strohballenbau und den nicht lasttragenden Strohballenbau. Beim lasttragenden Strohballenbau wird Stroh nicht nur zum Dämmen, sondern auch zum Abtragen von Lasten verwendet. Dabei werden Strohballen wie Ziegel übereinandergestapelt und außen wie innen verputzt.

Bei nicht lasttragenden Systemen mit Holzrahmenkonstruktionen fungiert das Stroh nur als Dämmmaterial. Die Lasten werden über die Holzkonstruktion abgetragen.⁴

3.1. Lasttragende Strohballensysteme

Bei den lasttragenden Strohballensystemen werden die Lasten direkt über die Strohballen abgetragen. Diese werden wie Ziegel übereinandergestapelt. Oft wird diese Art des Strobaus dem Ort des Entstehens nach auch als „Nebraska-Stil“ bezeichnet. Lasttragende Strohballensysteme bestechen vor allem durch ihre schnelle und einfache Herstellung und ihre guten wärmedämmenden Eigenschaften, die sich vor allem durch die Dicke der Strohballen ergeben.⁵ Von architektonischer Bedeutung ist besonders die Freiheit der Gestaltung von Strohballenwänden. Es lassen sich ganz einfach organische Formen sowie alle möglichen Arten von Rundungen realisieren⁶. Entscheidend für die Funktionalität solcher Wände sind das Verhältnis von Wandhöhe zu Wandstärke von 5:1 sowie eine gute Dichte der Strohballen. Um ein Einsacken von Strohballenwände zu vermeiden, werden diese meist vorgespannt (nachverdichtet).⁷ Auf das Vorspannen kann alternativ auch verzichtet werden, indem man mit dem Verputzen der Wände 5-8 Wochen wartet. In dieser Zeit setzen sich die Ballen natürlich und es sind keine Setzrisse im Putz mehr zu befürchten.⁸

⁴ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.21.

⁵ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.22f.

⁶ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.62.

⁷ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.22f.

⁸ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.56.

Die gängigsten Methoden, um Strohballenwände vorzuspannen sind mit Gewindestangen oder mit außenliegenden Spannseilen.

Bei der Methode mit Gewindestangen werden die Strohballen auf Gewindestangen aufgespießt und mit Holzbalken über Muttern nach unten gepresst.⁹

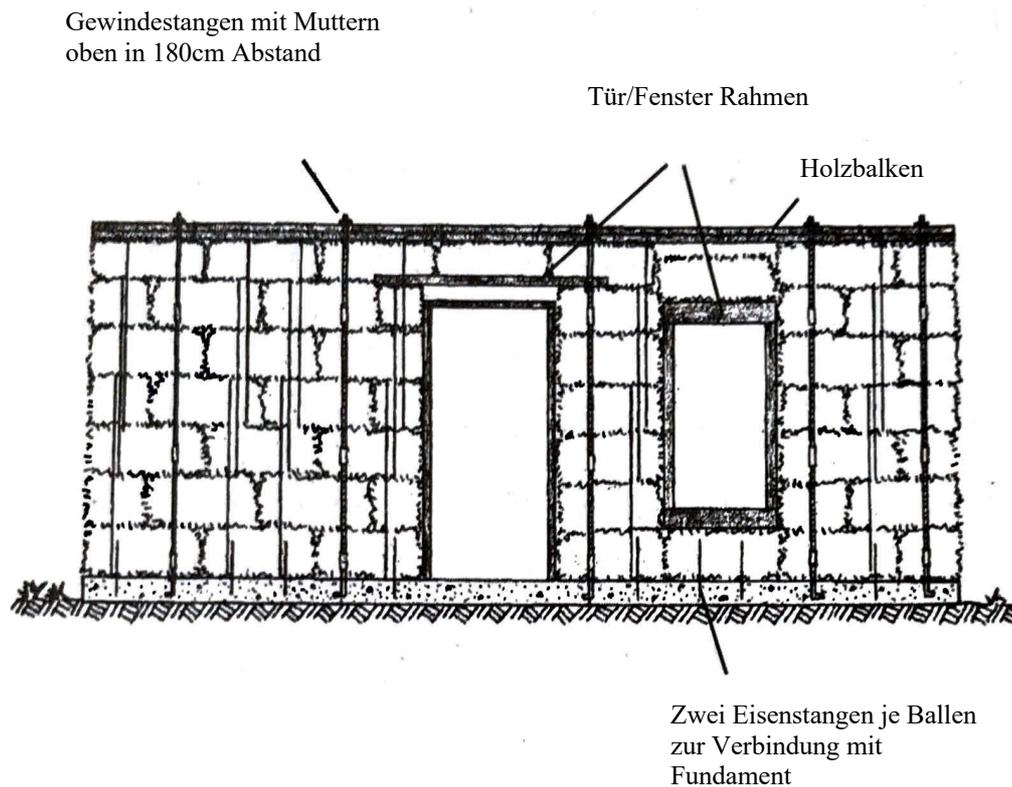


Abb. 1: Vorgespannte Wand mit Ringanker

(Quelle: Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.22.)

⁹ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.58.

Bei der Methode mit Spannseilen wird ein oberliegender Holzbalken mit außenliegenden Spannseilen nach unten gedrückt, was zu einer Verdichtung der Strohballen führt.

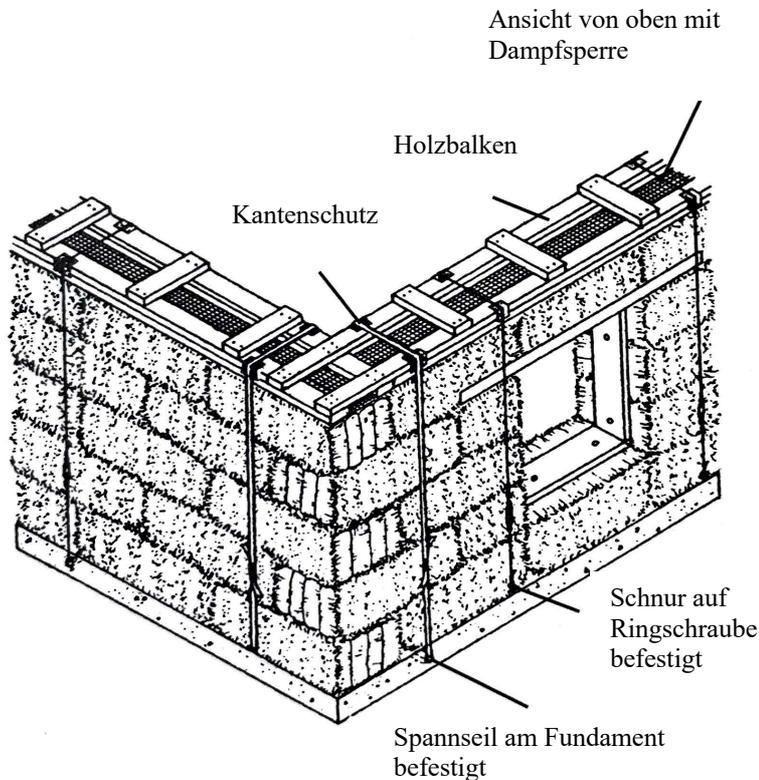


Abb. 2: Vorgespannte Wand mit Spannseilen

(Quelle: Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.22.)

Der Vollständigkeit halber sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass es eine weitere Möglichkeit im lasttragenden Strohballenbau gibt. Bei der Verwendung von Jumbo Großballen sind im Gegensatz zu den oben erwähnten Methoden auch mehrstöckige Bauten möglich. Sie werden in dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet, weil sie mit ihrem U-Wert von bis zu $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ nicht vergleichbar mit den anderen Wandaufbauten sind.¹⁰

¹⁰ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.60.

3.2. Nicht lasttragende Systeme mit Holzkonstruktion

Beim nicht lasttragenden Strohbau fungiert das Stroh nur als Dämmmaterial. Die Lasten werden über eine Holzkonstruktion abgetragen. Diese kann in beinahe beliebiger Form ausgebildet sein. Diese Bausysteme sind etwas komplexer und daher im Folgenden genauer erklärt.

3.2.1. Vollholzwand mit Strohdämmung außen

Vollholzwände bestehen meist aus KLH-Platten. Die Strohdämmung wird außen angebracht indem Strohballen mit Schnüren, die an in der Wand verklebten Dübeln befestigt sind, an der Holzwand festgezogen werden. Die Strohschicht wird außen üblicherweise mit einem Lehm- oder Kalkputz versehen. Dieser Wandaufbau hat den Vorteil, dass die KLH-Wand bereits winddicht ist. Außerdem entsteht außen eine lückenlose Strohdämmung ohne Wärmebrücken.¹¹

Als Beispiel für diese Bauweise wird der Wandaufbau des S-House in Böheimkirchen von Architekt Scheicher herangezogen. Die Schichtdicken des Aufbaues konnten nicht genau in Erfahrung gebracht werden. Daher wurde auf Basis von ähnlichen Projekten folgende Annahme getroffen. Der Aufbau von innen nach außen:

- 3 cm Lehmputz auf Schilfräger
- 10 cm KLH
- 50 cm Strohballen
- 3 cm Lehmputz
- 5 cm Hinterlüftungsebene / Holzstaffel (5 cm * 8 cm)
- 2,4 cm Holzfassade

¹¹ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufien bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.67.

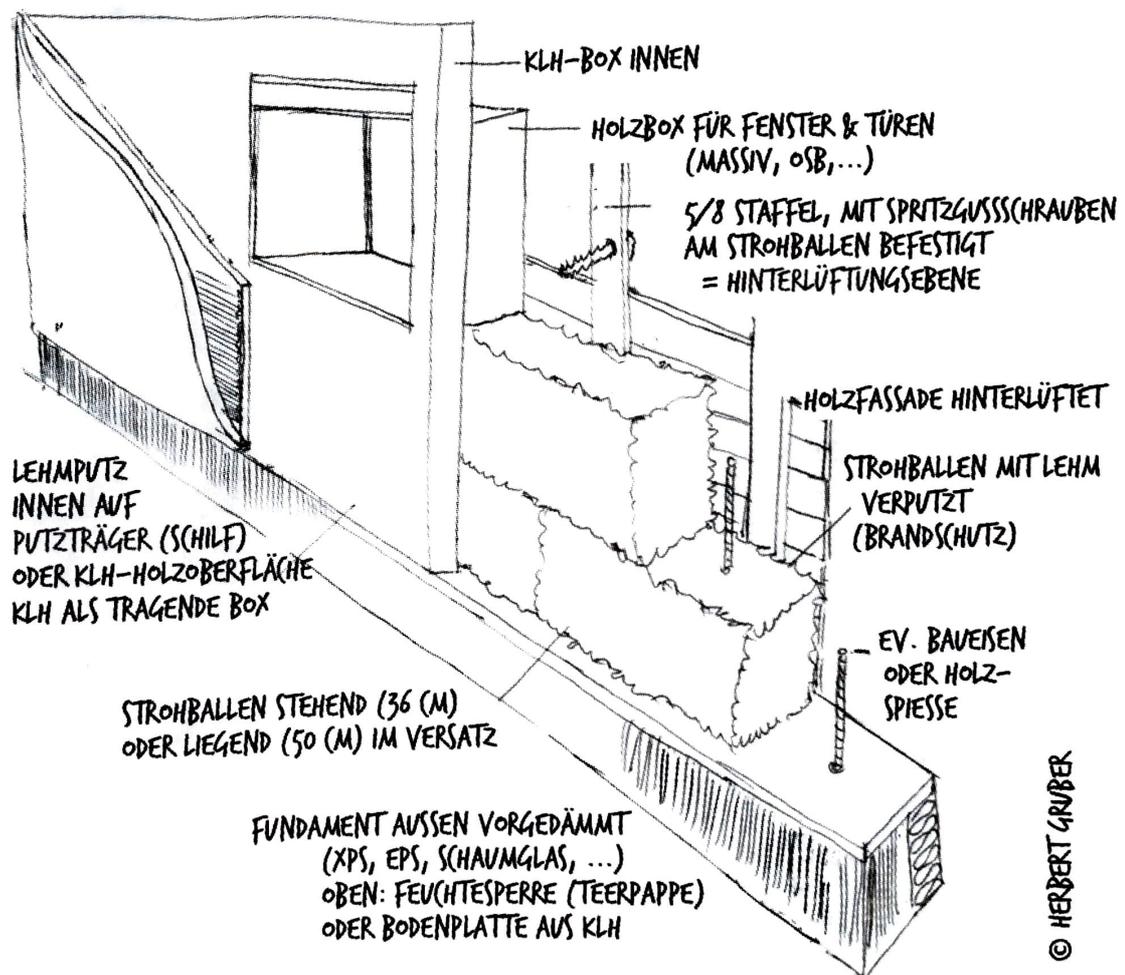


Abb. 3: Wandaufbau S-House

(Quelle: Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh in Europa*. 4. Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2012. S.6f.)

3.2.2. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion

Bei der ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion wird eine Holzrahmenkonstruktion mit Strohballen ausgefüllt. Die Strohballen weisen im Normalfall eine Dicke von 35 cm auf. Damit lässt sich ein U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen, was für ein Passivhaus ausreichend ist. Der Vorteil dieser Methode ist, dass man auf beiden Seiten der Wand Anschlusspunkte aus Holz hat, auf welche man weitere Schichten, wie etwa eine Holzvertäfelung oder eine vorgesetzte Fassade anbringen kann.¹²

Als Beispiel für diese Bauweise wird ein Wandaufbau der Firma Naturhaus Wechselland herangezogen. Der Aufbau von innen nach außen:

¹² Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3. Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.64.

- Lehmputz 4 cm
- Holzständerkonstruktion (6 cm * 12 cm) / Stroh (36 cm * 90 cm)
- Kalkputz 3 cm

Wie auf Abbildung 4 ersichtlich setzt das Naturhaus Wechselland auf eine Holrahmenkonstruktion aus 6 cm mal 12 cm starken Pfosten in Leiterform. Das hat zwei entscheidende Vorteile. Nach jeweils zwei Strohballen, also alle 90 cm werden diesem mit 2,4 cm dicken Querhölzern nach unten gepresst und dadurch weiter verdichtet. Außerdem entsteht nur eine minimale durchgängige Holzschicht von innen nach außen alle 90 cm, weil dort die „Quersprosse“ vom Leitersystem liegt. Mit dieser Methode können Wärmebrücken gut vermindert werden.

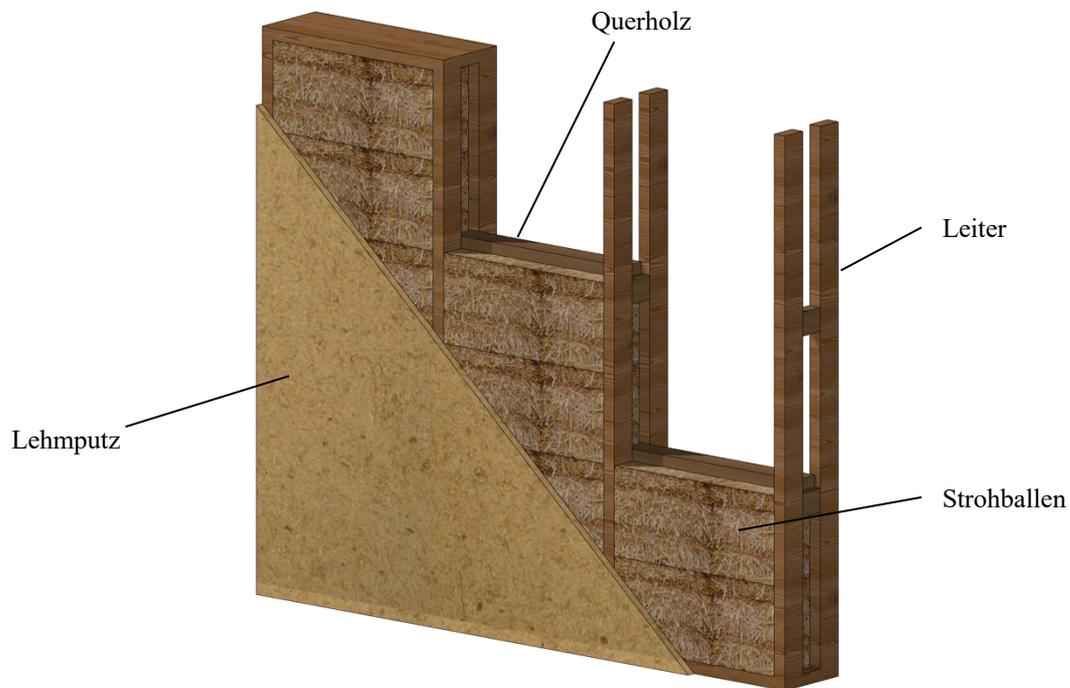


Abb. 4: Wandaufbau Naturhaus Wechselland

Der Vollständigkeit halber sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass sich im Kalkputz ein feinmaschiges Glasfasergitter befindet. Dieses fungiert als zusätzlicher Putzträger sowie als Ungezieferschutz. Es wird in der Simulation jedoch nicht berücksichtigt, da es keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat.

4. Definition der Randbedingungen

Um die drei in den letzten Kapiteln vorgestellten Bauweisen vergleichen zu können müssen bestimmte Randbedingungen eingehalten werden. Als Grundlage für den Vergleich wird ein U-Wert der Wandaufbauten von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ herangezogen. Dieser Wert entspricht der Minimalanforderung für eine Passivhauswand.¹³

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Kriterien der Europäischen Technischen-Zulassung (ETZ)¹⁴ für Baustrohballen eingehalten werden. Diese lauten wie folgt:

- Feuchtegehalt: <15 %
- Unkrautbesatz: <0,5 % der Masse
- Restkornanteil: <0,4 % der Masse

Es wird angenommen, dass die Strohballe immer stehend verbaut werden, weil der Wärmedurchgangswiderstand so deutlich höher ist. Bei liegenden Baustrohballen sind die Enden der Halme außen bzw. innen, während sie bei stehenden oben bzw. unten sind. Das trifft zwar nicht auf alle Halme in einem Strohballe zu, jedoch gibt es immer eine Hauptrichtung. Üblicherweise werden Strohballe im lasttragenden Strohballenbau liegend verbaut, weil sie aufgrund ihrer Dimensionen breiter sind und dadurch größere Lasten aufnehmen können. Heutzutage kann man die lasttragende Bauweise aber auch schon mit stehenden Strohballen anwenden, da sich die Dimensionen der Baustrohballen mit modernen Strohballenpressen individuell einstellen lassen.

Für die konkreten Kennwerte des Stroh werden folgende Annahmen getroffen:

- Dichte: 110 kg/m^3
- μ : 3
- λ : $0,045 \text{ W/mK}$ (Strohballen stehend) / λ : $0,06 \text{ W/mK}$ (Strohballen liegend)¹⁵
- nicht kapillar leitfähig

¹³ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufien bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.60.

¹⁴ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufien bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.53.

¹⁵ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.29.

5. Einflüsse auf die Lebensdauer von Stroh

5.1. Ungeziefer

Für Kleintiere wie Insekten und Nagetiere ist Stroh als Futter nicht geeignet. Die einzige Ausnahme stellen Termiten dar. Alle anderen Kleintiere können es schlichtweg nicht verdauen. Entscheidend ist ein möglichst kleiner Restkornanteil. Moderne Erntemaschinen können die Spreu vom Weizen fast zu 100 % trennen. Wichtig ist auch die Dichte der Strohballen. Sind diese zu locker gepresst, können Nisträume entstehen. Um zu vermeiden, dass sich das eine oder andere Tierchen dennoch eine Höhle gräbt, ist besonders auf die Qualität der Verschalung zu achten. Diese kann aus Holz, Werkstoffplatten, Putz oder einer Kombination bestehen. Gut bewährt hat sich ein Putzträger aus feinmaschigem Drahtgitter.¹⁶

5.2. Feuchtigkeit

Der Feuchtegehalt von Baustrohballen sollte zwischen 8 und 14 % der Masse des Trockengewichts liegen, um die volle wärmedämmende Wirkung zu gewährleisten.¹⁷ Eine hohe Feuchtigkeit schadet nicht nur der Dämmwirkung, sondern fördert auch das Wachstum von Mikroorganismen und dadurch die Verrottung des Baustoffes. Um die Grenzwerte der Feuchte einzuhalten gilt es, das Stroh so gut wie möglich vor Feuchtigkeit zu schützen. Das betrifft den Schutz vor Regen- und Spritzwasser sowie aufsteigende Bodenfeuchte, die das Stroh von außen angreifen sowie den Schutz vor Tauwasser, das mitten im Stroh anfallen kann.

Das Stroh kann auf verschiedenen Arten gut vor Regen- und Spritzwasser geschützt werden. Der Regenschutz kann durch ein weit auskragendes Dach gewährleistet sein. Sollte die Architektur das nicht zulassen, haben sich vorgesetzte Fassaden oder Kalkputze bewährt. Besonders im Bereich des Bodens sind Vorkehrungen zu treffen, damit Spritzwasser nicht von der Wand aufgenommen werden kann oder es gar nicht auftritt. Die Vermeidung der Aufnahme von Spritzwasser kann durch

¹⁶ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufien bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.46.

¹⁷ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufien bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.48f.

spezielle Abdichtungen, beispielsweise aus Kautschuk oder Teerpappe erfolgen. Spritzwasser kann durch die richtige Materialwahl des Bodens vor der Fassade wie durch Kies auch gut vermieden werden.¹⁸

Um das Stroh vor aufsteigender Bodenfeuchte zu schützen ist eine wasserdichte Ebene zwischen Fundament und Wand unumgänglich. Des Weiteren ist es ratsam, das Stroh nicht direkt auf Beton zu lagern. Eine dampfdurchlässige und kapillARBrechende Schicht wie Perlite oder Leca sollten die Basis für Stroh darstellen.¹⁹

Der Schutz vor Tauwasser funktioniert im Strohbau wie bei anderen Dämmmaterialien. Die Dampfdurchlässigkeit der Wandschichten sollte von innen nach außen zunehmen. Wenn das nicht gewährleistet werden kann, sollte eine Dampfsperre oder Dampfbremse an der Innenseite der Wand angebracht werden.

In kalten Regionen ist es trotzdem möglich, dass im Winter Kondenswasser im Inneren des Strohs auftritt. Das stellt kein Problem dar, sofern das Wasser zeitnah wieder austrocknen kann. Besonders Wärmebrücken sind anfällig für Kondenswasser und daher zu vermeiden.²⁰ In diesem Zusammenhang stellen besonders Stahlteile eine Gefahr für das Stroh dar. Stahl wirkt im Stroh als Wärmebrücke und ist daher sehr anfällig für die Bildung von Kondenswasser.²¹

Wie schon erwähnt, ist für das Wachstum von Mikroorganismen besonders der Feuchtegehalt im Stroh entscheidend. Dieser kann auch durch eine hohe Feuchte der Umgebungsluft hervorgerufen werden. Es bedarf also nicht unbedingt einer Kondensation im Stroh. Gründe dafür sind die kapillare Kondensation sowie die osmotische Bindung von Wassermolekülen an Mikroorganismen, die im nächsten Kapitel erläutert wird.

¹⁸ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.30f.

¹⁹ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.51.

²⁰ Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: *Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005. S.31.

²¹ Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: *Neues Bauen mit Stroh*. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008. S.51.

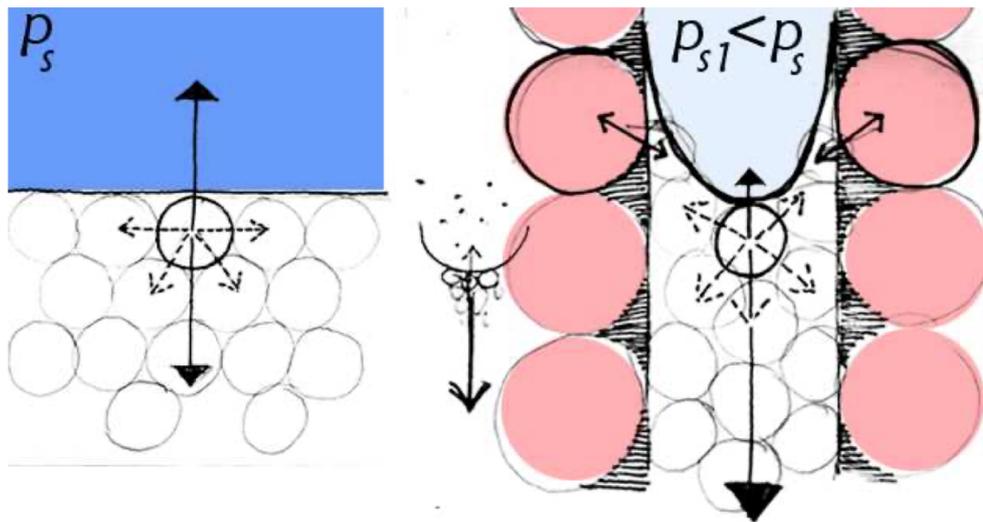


Abb. 5: Kapillare Kondensation

(Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.46.)

Abbildung 5 erläutert das Prinzip der kapillaren Kondensation. Auf ebenen Oberflächen (links im Bild die blaue Fläche) kondensiert Wasser, wenn der Sättigungsdampfdruck, also jene Luftfeuchtigkeit, bei der die Luft das Wasser nicht mehr halten kann, erreicht ist. Das Wassermolekül haftet sich an die Oberfläche fest, wenn der Sättigungsdampfdruck erreicht ist und löst sich in der Luft, wenn dieser unterschritten ist. Auf der rechten Seite des Bildes ist im Gegensatz dazu die Oberfläche (rosa) eine Kapillare, also eine enge Röhre. Im engen Raum der Röhre haften die Wassermoleküle stärker aneinander, was zur Folge hat, dass der Sättigungsdampfdruck weiter unterschritten werden muss, als es bei einer ebenen Oberfläche der Fall wäre, damit sich die Wassermoleküle an die Luft binden. Damit ist der Sättigungsdampfdruck in der Kapillare kleiner als an der ebenen Oberfläche.²²

Der Feuchtegehalt in Stroh ist abhängig von der relativen Feuchte der Umgebungsluft. Wegen der kapillaren Kondensation kondensiert Wasser in einem hygroskopischen Material wie Stroh bereits unter dem Sättigungsdampfdruck. Umso größer die Kapillare sind, desto größer muss der Dampfdruck und daher auch

²² Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.46.

die relative Luftfeuchtigkeit sein, damit das Wasser nicht mehr von der Oberfläche verdampft.²³

Durch die kapillare Kondensation stellt sich eine sogenannte Gleichgewichtsfeuchte im Stroh ein. Diese entspricht der Masse des sich im Material befindlichen Wassers im Verhältnis zur Masse des Trockengewichts des Materials.

Die Gleichgewichtsfeuchte wird jedoch selten erreicht, weil der Feuchtetransport in Stroh träge vonstatten geht und sich die relative Luftfeuchtigkeit schnell ändert. Es dauert durchschnittlich 10 bis 13 Stunden, bis sich in Stroh 90 % der Gleichgewichtsfeuchte einstellt.²⁴

²³ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.46.

²⁴ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.52.

5.3. Zersetzung durch Mikroorganismen

Anorganische Elemente wie z.B. Sauerstoff, Wasserstoff oder Kohlenstoff durchlaufen während des Wachstums das Stroh in Form von Lösungsmitteln. Einige dieser Elemente werden zu Molekülen, wodurch in der neuen Pflanze neue organische Substanzen entstehen. Die Zersetzung kehrt diesen Prozess um. Nach der Ernte enthält Stroh ein Reservoir an organischen Elementen. Der Abbau organischer Moleküle in anorganische Elemente findet durch einen chemischen Prozess statt, der durch Enzyme ausgelöst wird, die von Bakterien und Pilzen freigesetzt werden. Der Prozess kann aber auch durch Mikroorganismen ausgelöst werden.²⁵

Mikroorganismen, Bakterien und Pilze sind allgegenwärtig. Auf Pflanzen haften sie sich an der sogenannten Phyllosphäre- der Oberfläche fest. Der Großteil der mikrobiellen Population wird regelmäßig von Regen gewaschen oder von UV-Strahlen oder Pflanzenschutzmitteln zerstört. Während die Pflanze lebt, ist sie meistens stark genug, diesen Organismen zu widerstehen. Erst mit dem Tod der Pflanze – im Fall von Stroh der Ernte, beginnen die Organismen aktiv zu werden. Um zu gedeihen benötigen Mikroorganismen, Bakterien und Pilze wie im Kapitel 5.3 beschrieben, bestimmte Bedingungen, was Nährstoffe (Substrat), Sauerstoff, Feuchte und Temperatur betrifft. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, bleiben die Organismen inaktiv. Im Falle einer Strohballenwand bleiben die meisten Organismen ein Jahr lang inaktiv, bevor Sie absterben. Manche Pilzsporen können jedoch bis zu 50 Jahre lang inaktiv „überleben“.²⁶

Die Zersetzung von Stroh kann auch anaerob, also ohne Sauerstoff vonstatten gehen. In diesem Fall ist aber deutlich mehr Feuchtigkeit nötig.²⁷

²⁵ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.21.

²⁶ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.22ff.

²⁷ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.32f.

Wie schon erwähnt brauchen Mikroorganismen Wasser, um sich vermehren zu können. Das Wasser kann von der Luft über einen osmotischen Prozess aufgenommen werden. Bei einer Luftfeuchtigkeit unter 100 % bildet der Organismus eine Lösung in seinem Inneren, die Wassermoleküle stärker bindet als Luft. Dadurch entsteht in dem Bereich um einen Mikroorganismus ein niedrigerer Sättigungsdampfdruck.²⁸

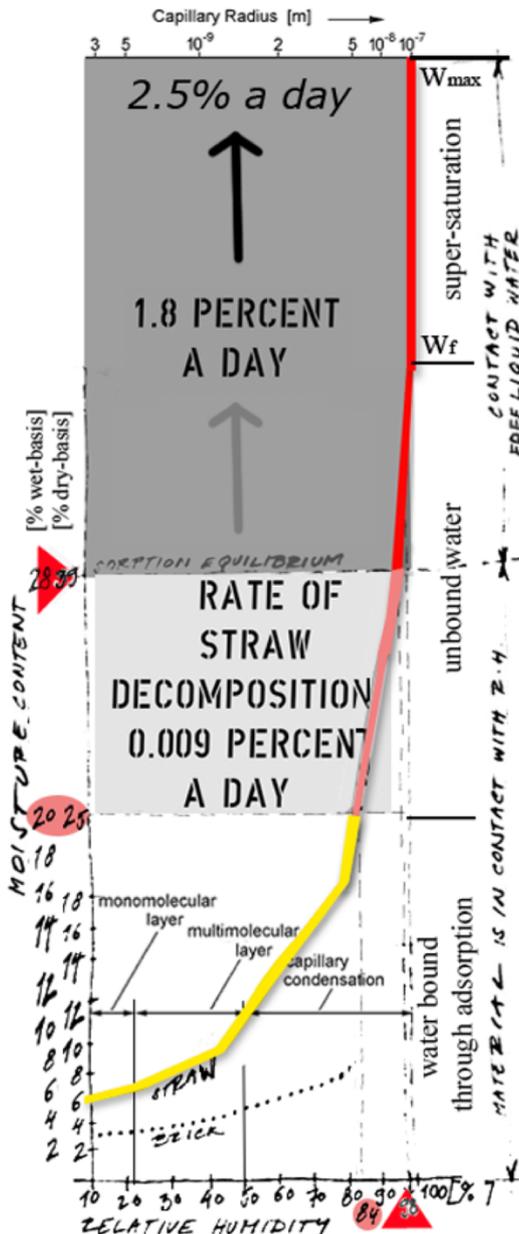


Abb. 6: Zersetzung von Stroh in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte

(Wuhan, Jakob: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.55.)

²⁸ Wuhan, Jakob: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.50.

Aufgrund von Messungen lassen sich einige gesicherte Aussagen über den Zerfall von Stroh treffen. Der Zerfall ist unterhalb von 5 °C vernachlässigbar und erreicht ein Optimum bei etwa 30 °C. Ab einem relativen Luftfeuchtegehalt im Stroh von 98 % (39 % der Trockenmasse) beginnt die Zersetzung von Stroh in einem signifikanten Ausmaß, da die Strohfasern an diesem Punkt mit Wasser gesättigt sind und Mikroorganismen auf der Strohoberfläche gedeihen können. Wenn dieser Punkt erreicht ist, erreicht das Tempo der Zersetzung 1,8 – 2,5 % pro Tag. Im Bereich der relativen Luftfeuchte im Stroh zwischen 84 % und 98 % liegt die Geschwindigkeit der Zersetzung bei 0,009 % je Tag. Unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 84 % ist keine Zersetzung feststellbar.²⁹

Am eindeutigsten lässt sich die Zersetzung daher anhand der relativen Luftfeuchte im Stroh feststellen. Erst ab einer Sättigung von 84 % kann begonnen werden mit einem Zerfall zu rechnen.

²⁹ Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. London: University of East London School of Computing and Technology 2007. S.55.

5.4. Schimmel

Schimmel ist fast überall vorhanden und bewegt sich durch Luftbewegung weiter. Unter bestimmten Bedingungen beginnt Schimmel zu wachsen und sich auszubreiten. Das Wachstum, bzw. die Fortpflanzung lässt sich in drei Phasen unterteilen: Sporenkeimung → Myzelwachstum → Sporulation

Die ersten beiden Phasen bezeichnen das Wachstum. Mit der Sporulation kann sich die Spore vermehren und ausbreiten.³⁰

Die Bedingungen für das Durchlaufen dieser Phasen sind an die drei Parameter Temperatur, Feuchte und Substrat gekoppelt.

Sporenkeimung ist je nach Gattung des Pilzes bei Temperaturen zwischen 0 und 50°C möglich. Die relative Luftfeuchte sollte für gute Keimung je nach Gattung des Pilzes zwischen 69 und 100% liegen.³¹

Als Substrat bezeichnet man den Nährboden, auf dem der Schimmel wächst. Der Einfluss des Substrats auf das Wachstum von Schimmelpilzkulturen in Innenräumen ist im Isoplethenmodell mit drei Gruppen bedacht. Substratgruppe 0 (z.B. Vollmedien) bietet optimalen Nährboden. Auf Substratgruppe 0 ist Schimmel am anspruchslosesten was die Temperatur- und Feuchtebedingungen angeht.

In Substratgruppe I fallen Baustoffe mit gut verwertbaren Substraten wie z.B. Tapeten, verschiedene Holzwerkstoffe, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen und stark verschmutztes Material. Am schlechtesten wächst Schimmel auf Substratgruppe II. Diese wird vor allem von mineralischen Baustoffen gebildet.³²

Diesen Kriterien zufolge fällt Stroh als Bauprodukt aus gut abbaubaren Rohstoffen in Substratgruppe I.

³⁰ WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. 2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag. S.5ff.

³¹ WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. 2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag. S.9ff.

³² WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. 2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag. S.12ff.

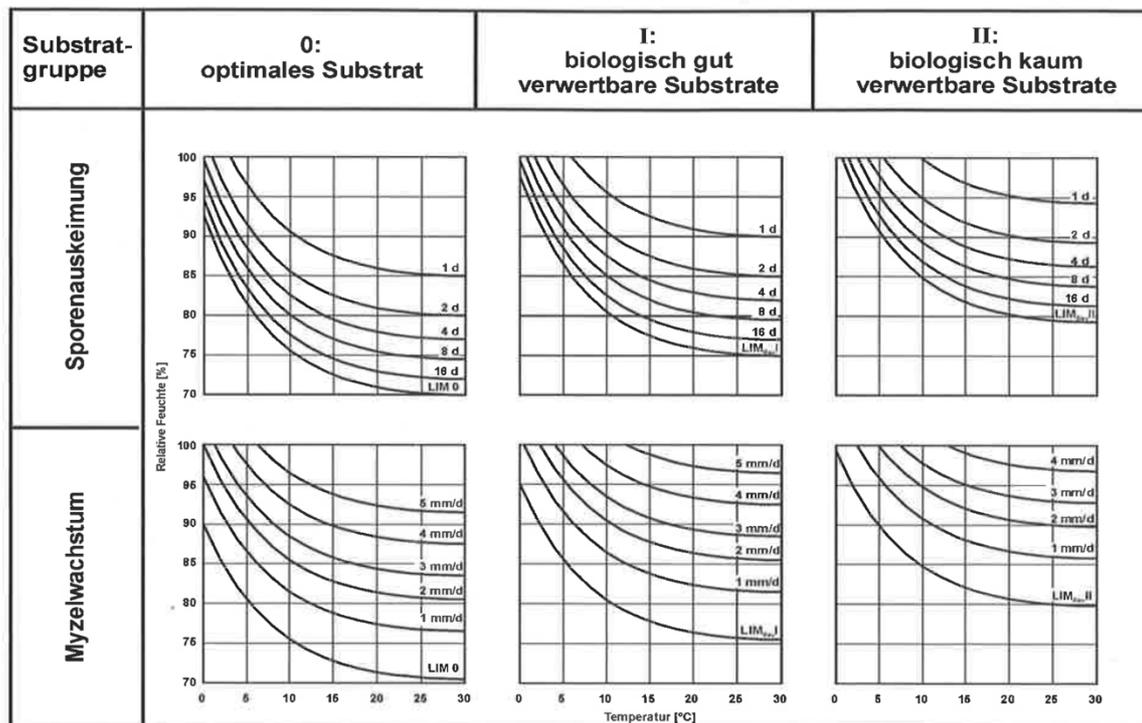


Abb. 7: Isoplethenmodell

(WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. 2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag)

Wie auf Abbildung X ersichtlich beginnt die Sporenauskeimung in Substratgruppe I bei einer relativen Feuchte der Luft von 75 % bei einer Temperatur von 30 °C.

Das Isoplethenmodell berücksichtigt das Schimmelpilzwachstum bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen. Es kann daher nur über einen begrenzten Zeitraum mit konstanten Bedingungen verlässliche Rückschlüsse liefern. Um eine sich verändernde Umgebung, wie sie in der Realität vorkommt, zu simulieren bedarf es eines dynamischen Modells. Dafür wurde das VTT-Schimmelmodell entwickelt. Mit diesem Modell können auch ein Austrocknungseffekt und ein eventuelles Absterben der Sporen berücksichtigt werden.³³

Das VTT-Schimmelmodell benötigt fünf Eingabeparamter:

- Temperaturverlauf
- Relative Feuchte
- Typ des Materials

³³ WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. 2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag. S.14ff.

- Typ der Oberfläche
- Typ der Schimmelrückbildung

Typ des Materials

- Sehr empfindlich: Splintholz Kiefer
- Empfindlich: Fichte, Holzwerkstoffplatte, Brettschichtholz
- Mittel beständig: Beton, Mineralwolle, Porenbeton
- Beständig: EPS

Typ der Oberfläche

- Sehr empfindlich: unbehandelt, reich an Nährstoffen
- Empfindlich: Hobelmaterial, papierbeschichtete Produkte, Holzwerkstoffe
- Mittel beständig: zementhaltige Materialien, Kunststoffe, Mineralwolle
- Beständig: Glas und Metall, mit Schutzmitteln beschichtet

Typ der Schimmelrückbildung

- Fast keine Rückbildung: Leichtbeton, PE, EPS
- relativ geringe Rückbildung: Beton, Brettschichtholz, polierte Oberflächen
- erhebliche Rückbildung: Porenbeton
- kurzfristige Rückbildung: unbehandeltes Holz³⁴

³⁴ Nicolai, Andreas/Fechner, Heiko: PostProc 2 Handbuch. In: https://www.bauklimatik-dresden.de/postproc/help/de/index.html#_ytt_schimmelmodell (letzter Zugriff: 27. 06. 2020)

In nachfolgender Tabelle lässt sich das Schimmelwachstum aufgrund des Schimmelindex ablesen.

Schimmelindex	Wachstum	Beschreibung
0	kein Wachstum	Sporen nicht aktiv
1	mikroskopisch sichtbares, geringes Wachstum	Auskeimung
2	mikroskopisch sichtbar, <10% Bedeckung	-
3	visuell sichtbar, 10-30% Bedeckung	Neue Sporen werden produziert
4	visuell sichtbar, 30-70% Bedeckung	Mittleres Wachstum
5	visuell sichtbar, >70% Bedeckung	Starkes Wachstum
6	Bedeckung 100%	Sehr starker und dichter Bewuchs

Tab. 1: Schimmelindex

(Quelle: Nicolai, Andreas/Fechner, Heiko: PostProc 2 Handbuch. In: https://www.bauklimatik-dresden.de/postproc/help/de/index.html#_vtt_schimmelmodell (letzter Zugriff: 27. 06. 2020))

6. Die Lebensdauer eines Bauteils

Die Lebensdauer eines Gebäudeteils ist nicht genau definiert. Man könnte darunter verstehen, wie lange etwas existiert oder imstande ist zu existieren. Bei einem Bauteil hat das jedoch wenig Sinn. Nur weil eine Wand oder ein Fenster existiert, heißt es nicht, dass das Teil noch taugt. Daher ist in dieser Arbeit in Zusammenhang mit Lebensdauer die Zeit gemeint, in der ein Gebäudeteil gebrauchstauglich ist.

Eine Wand ist gebrauchstauglich, solange sie die ihr zugeschriebenen bauphysikalischen Eigenschaften erfüllt. In dieser Arbeit werden nur tragende Außenwände verglichen. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

- Tragfähigkeit
- Wärmeschutz
- Schallschutz
- Brandschutz
- Feuchtigkeitsschutz³⁵

Bei der Betrachtung eines einzigen Gebäudeteils, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, ist es nicht möglich, die Tragfähigkeit zu beurteilen, da man die abzutragenden Lasten nicht kennt. Außerdem spielt die Tragfähigkeit als Faktum für die Gebrauchstauglichkeit nur bei der lasttragenden Strohballenwand eine Rolle, weil das Stroh bei allen anderen Bauweisen keine tragende Funktion übernimmt. Der Schallschutz ist für die Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit auch nur mäßig geeignet, weil er gemäß OIB-Richtlinie 6 vom Standort des gebauten Hauses abhängig ist. Auch die nähere Begutachtung des Brandschutzes ist unnötig, da sich diese Arbeit um mögliche Langzeitnutzungsdauern drehen soll.

Der Feuchtigkeitsschutz geht mit dem Wärmeschutz einher und wird im Laufe der hygrothermischen Untersuchungen beleuchtet. Gemäß ÖNORM B 8110-2: 1995 darf das sich in einer Wand befindliche Tauwasser den Wärmedurchlasswiderstand dieser nicht um mehr als 10 % verringern.³⁶ Dieses Kriterium wird auch in dieser Arbeit herangezogen, um die Grenze der Gebrauchstauglichkeit zu markieren.

³⁵ Pech, Anton: BK040 Waende 20071029 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19. S.6ff.

³⁶ Pech, Anton: BK010 Bauphysik 20120831 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19. S.31.

7. Methode

Um die Lebensdauer von Stroh im eingebauten Zustand zu untersuchen, werden die bereits erwähnten, gängigen Wandaufbauten mit Stroh verglichen. Dazu müssen zuerst die Wandstärken bzw. die Dicke der Strohschicht im Aufbau definiert werden. Um die Aufbauten vergleichbar zu machen wird ein U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ herangezogen. Die Dicke der Strohschicht als das maßgebende wärmedämmende Material leitet sich in den einzelnen Aufbauten daraus ab.

Zur Übersicht hier nochmal die Wandkonstruktionen:

1. Lasttragende Strohballenwand
2. Vollholzwand mit Strohdämmung außen
3. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion

Die Lebensdauer ist, sofern das Stroh ordentlich verbaut wurde, vom Wachstum der Mikroorganismen sowie vom anaeroben Zerfall abhängig. Das Wachstum der Mikroorganismen ist abhängig von der Temperatur und der relativen Feuchte. Der anaerobe Zerfall korreliert mit der Feuchte im Stroh. Mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen werden diese Parameter gegenübergestellt.

Zu Berechnung des Schimmelwachstums werden das Isoplethenmodell sowie das VTT Schimmelmodell angewendet. Das VTT Schimmelmodell ist ein mathematisches Modell zur dynamischen Berechnung des Schimmelwachstums. Es ist im Gegensatz zum Isoplethenmodell in der Lage Austrocknungseffekte und ein eventuelles Absterben der Sporen zu berücksichtigen. Zur Simulation des Isoplethenmodells sowie des VTT Schimmelmodells wird das Programm Delphin 6 mit Post Proc 2 von Bauklimatik Dresden verwendet.

Es wurden folgende Einstellungen getroffen:

- Typ des Materials: empfindlich
- Typ der Oberfläche: empfindlich
- Typ der Schimmelrückbildung: relativ geringer Rückbildung

Die Feuchte im Stroh wird über die relative Luftfeuchte ermittelt. Daraus lassen sich wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt, direkte Rückschlüsse über

den Zerfall von Stroh ziehen. Die Simulation erfolgt ebenfalls mit Delphin 6 und Post Proc 2. Mit Hilfe von Microsoft Excel wird im Anschluss eruiert wie lange die relative Luftfeuchte im Stroh über den kritischen Werten von 84 % (0,009 % Zerfall je Tag) bzw. 98 % (1,8-2,5 % Zerfall je Tag) liegt. Daraus lässt sich direkt die Lebensdauer des Strohs berechnen.

Um herauszufinden wie groß die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial ist, reicht es nicht zu wissen, wie lange es dauert, bis das Stroh zerfällt. Vielmehr gilt es herauszufinden, wie lange es dauert, bis die Gebrauchstauglichkeit eines Bauteils zufolge Zerfall nicht mehr gegeben ist.

7.1. Berechnung der Strohschichtdicke

Die Grundlage dieser Berechnungen bildet der U-Wert von $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der U-Wert ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R_T .

Der Wärmedurchgangswiderstandes R einer Wandschicht berechnet sich wie folgt:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Bei homogenen Bauteilen summiert man die Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Bauteilschichten und die Wärmeübergangswiderstände der innenliegenden und außenliegenden Luftschicht R_{Si} ($0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$) und R_{Se} ($0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$), um aus der Summe den U-Wert zu bilden. Die Wärmeübergangswiderstände R_{Si} und R_{Se} ergeben sich durch eine stehende Luftschicht direkt vor einem Bauteil, die wie eine zusätzliche wärmedämmende Ebene wirken.³⁷

$$R_T = R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}$$

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Bei inhomogenen Bauteilen ist der Wärmeübergangswiderstand R der Mittelwert eines oberen und unteren Grenzwertes. Dieses Verfahren kann jedoch nur angewendet werden, wenn der obere Grenzwert maximal das 1,5-fache des unteren Grenzwertes beträgt. Der obere Grenzwert ist der flächengewichtete Mittelwert der Teildurchgangswiderstände. Der untere Grenzwert ist die flächengewichtete Mittelung der Wärmedurchlasswiderstände je Schicht.³⁸

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}$$

R'_T ... oberer Grenzwert

R''_T ... unterer Grenzwert

³⁷ Pech, Anton: BK010 Bauphysik 20120831 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19. S.14f.

³⁸ Pech, Anton: BK010 Bauphysik 20120831 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19. S.17.

$$\frac{1}{R'_T} = \sum_k \frac{f_k}{R_{Tk}}$$

f_k ... Flächenanteil des Abschnittes k

R_{Tk} ... Wärmedurchgangswiderstand für den Abschnitt k

$$R''_T = R_{Si} + \sum_j R_j + R_{Se}$$

$$\frac{1}{R_j} = \sum_k \frac{f_k}{R_k}$$

Für die Lambda-Werte der Baumaterialien wurden die Materialdaten aus Delphin 6 herangezogen:

- Lehm (historisch) [156] - $\lambda = 0,7$ W/mK
- Kalk (historisch) [148] - $\lambda = 0,82$ W/mK
- Fichtenholz SW Radial [460] - $\lambda = 0,13$ W/mK

Die Materialkenndaten von Stroh mussten in einem eigens erstellen „Strohdatenfile“ in Delphin 6 eingespielt werden.

7.1.1. Lasttragende Strohballenwand

Die lasttragende Strohballenwand ist ein homogener Bauteil. Sie besteht in diesem Fall aus 3 Materialien: Stroh, Lehm & Kalk.

Der Wandaufbau von innen nach außen:

- 5 cm Lehmputz
- Stroh
- 3 cm Kalkputz

Nachdem der U-Wert 0,15 betragen muss und die Dicke des Lehm- und Kalkputz gegeben sind, ist die Dicke der Strohschicht zu berechnen.

$$R_{Lehm} = \frac{0,05m}{0,7 \frac{W}{mK}} = 0,071 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{Kalk} = \frac{0,03m}{0,82 \frac{W}{mK}} = 0,037 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_T = \frac{1}{0,15 \frac{W}{m^2K}} = 6,67 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{Stroh} = 6,67 \frac{m^2K}{W} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,071 \frac{m^2K}{W} - 0,037 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} = 6,39 \frac{m^2K}{W}$$

$$d_{Stroh} = 6,39 \frac{m^2K}{W} * 0,045 \frac{W}{mK} = 0,29m$$

Die Dicke der Strohschicht beträgt 29 cm.

7.1.2. Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

Bei dieser Konstruktionsweise handelt es sich um eine homogene Wand. Es kann argumentiert werden, dass es sich durch die Hinterlüftungsebene und den sich darin befindlichen Holzpfeilen um eine inhomogene Wand handelt. In der Hinterlüftungsebene ist jedoch mit Außentemperatur zu rechnen, was sie für die hygrothermische Simulation überflüssig macht.

Daher wird für die Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmung folgender vereinfachte Wandaufbau angenommen:

- 3 cm Lehmputz
- 10 cm KLH
- Stroh
- 3 cm Lehmputz

$$R_{Lehm} = \frac{0,03m}{0,7 \frac{W}{mK}} = 0,043 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{KLH} = \frac{0,1m}{0,13 \frac{W}{mK}} = 0,769 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_T = \frac{1}{0,15 \frac{W}{m^2K}} = 6,67 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{Stroh} = 6,67 \frac{m^2K}{W} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,043 \frac{m^2K}{W} - 0,769 \frac{m^2K}{W} - 0,043 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{Stroh} = 5,65 \frac{m^2K}{W}$$

$$d_{Stroh} = 5,65 \frac{m^2K}{W} * 0,045 \frac{W}{mK} = 0,25m$$

Die Dicke der Strohschicht beträgt 25 cm.

7.1.3. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion

Die ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion ist ein inhomogener Bauteil.

Der Wandaufbau von innen nach außen:

- 4 cm Lehmputz
- Holzständerkonstruktion (6 cm * 12 cm) / Stroh (36 cm * 90 cm)
- 3cm Kalkputz

Um die Sprossen der Leiter sowie die Querhölzer in einer zweidimensionalen Simulation berücksichtigen zu können, wird ein alternativer Aufbau herangezogen. Dazu wird der prozentuelle Anteil des von der Lehmschicht bis zur Kalkschicht durchgehenden Holzes berechnet:

Von je 90 cm Höhe des Leitersystems fallen 14,4 cm, also 12 cm der Quersprosse und 2,4 cm des Querholzes in Holz aus. Der Rest besteht aus Stroh. Damit besteht die Konstruktion im Bereich der Leiter zu 16 % aus Holz und zu 84 % aus Stroh.

Dieser Wert wird in der Simulation mit einer Brücke zwischen den stehenden Hölzern der Leiter berücksichtigt.

Nachdem die Leiter eine Breite von 6 cm hat, muss die Brücke eine Breite von ca. 1 cm aufweisen.

Der übrige Anteil der Querhölzer in der Strohschicht wird nicht berücksichtigt, weil er weniger als 1% der Strohschicht beträgt und nicht von der Kalkschicht bis in die Lehmschicht durchgängig ist.

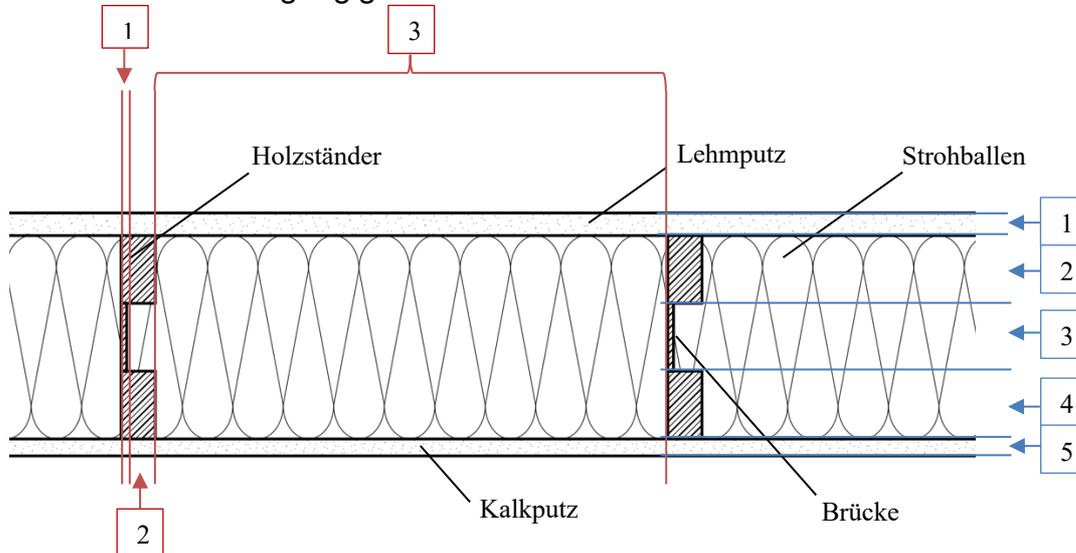


Abb. 8: Alternativer Wandaufbau Naturhaus Wechselland

In einem inhomogenen Bauteil lässt sich die Dicke der Strohschicht aus einer oberen und einer unteren Dicke analog zur Berechnung des U-Wertes bei inhomogenen Bauteilen berechnen. Dazu wird im ersten Schritt folgende Annahme getroffen:

$$R_T = R'_T = R_T'' = \frac{1}{0,15 \frac{W}{m^2K}} = 6,67 \frac{m^2K}{W}$$

Berechnung des oberen Grenzwertes:

$$\frac{1}{R'_T} = \sum_k \frac{f_k}{R_{Tk}}$$

Der auf Abbildung 8 ersichtliche Wandaufbau besteht im Wesentlichen aus 3 Teilen (in rot dargestellt):

Der Bereich der Brücke – 1 %

Der Bereich der Leiter wo Stroh zwischen den Holzständern ist – 5 %

Der Bereich der Strohbälle – 94 %

Diese 3 Bereiche werden für die Berechnung des oberen Grenzwertes in R_{T1}' , R_{T2}' und R_{T3}' aufgeteilt.

	λ [W/(mK)]	d [m]	R=d/ λ [m ² K/W]
R _{si}			0,13
Lehmputz	0,7	0,04	0,06
Holzständer/Brücke	0,13	0,36	2,77
Kalkputz	0,83	0,03	0,04
R _{se}			0,04
R _{T1}			3,03

	λ [W/(mK)]	d [m]	R=d/ λ [m ² K/W]
R _{si}			0,13
Lehmputz	0,7	0,04	0,06
Holzständer	0,13	0,12	0,92
Stroh	0,045	0,12	2,67
Holzständer	0,13	0,12	0,92
Kalkputz	0,83	0,03	0,04
R _{se}			0,04
R _{T2}			4,78

Daraus ergibt sich eine Gleichung mit einer Unbekannten RT3

$$\frac{1}{\frac{0,01}{3,03 \frac{m^2 K}{W}} + \frac{0,05}{4,78 \frac{m^2 K}{W}} + \frac{0,94}{R_{T3}}} = 6,67 \frac{m^2 K}{W} = R'_T$$

$$\rightarrow R_{T3} = 6,9 \frac{m^2 K}{W}$$

Mit RT3 = 6,9 lässt sich wie folgt die Dicke der Strohschicht berechnen:

$$6,9 \frac{m^2 K}{W} - 0,13 \frac{m^2 K}{W} - 0,06 \frac{m^2 K}{W} - 0,04 \frac{m^2 K}{W} - 0,04 \frac{m^2 K}{W} = 6,63 \frac{m^2 K}{W}$$

$$d_{Stroh} = 6,63 \frac{m^2 K}{W} * 0,045 \frac{W}{mK} = 0,3 m$$

Der obere Grenzwert der Dicke der Strohschicht beträgt 30 cm.

Berechnung des unteren Grenzwertes:

Die Schichtweise Betrachtung zur Berechnung des unteren Grenzwertes ist auf Abbildung 8 in blau ersichtlich. Der Grenzwert berechnet sich durch Addition der

Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Schichten. Für jede Schicht wird ein durchschnittlicher λ - Wert ermittelt. In der Lehm- sowie in der Kalkschicht bleibt der λ - Wert unverändert. Für die Schichten 2 - 4 berechnet sich λ wie folgt:

$$\lambda_2 = 0,045 \frac{W}{mK} * 0,94 + 0,13 \frac{W}{mK} * 0,05 = 0,048 \frac{W}{mK}$$

$$\lambda_3 = 0,045 \frac{W}{mK} * 0,99 + 0,13 \frac{W}{mK} * 0,01 = 0,046 \frac{W}{mK}$$

$$\lambda_4 = \lambda_2$$

	λ [W / (m K)]	d [m]	R = d / λ [m 2 K / W]
R _{si}			0,13
Lehmputz	0,7	0,04	0,06
Holzständer / Stroh	0,048	0,12	2,50
Brücke / Stroh	0,046	d ₃	R _x
Holzständer / Stroh	0,048	0,12	2,50
Kalkputz	0,83	0,03	0,04
R _{se}			0,04
R _{T2}			6,67

$$R_x = 6,67 \frac{m^2K}{W} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,06 \frac{m^2K}{W} - 2,5 \frac{m^2K}{W} - 2,5 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_x = 1,4 \frac{m^2K}{W}$$

$$d_3 = 1,4 \frac{m^2K}{W} * 0,046 \frac{W}{mK} = 0,064m$$

$$d_{Stroh} = d_2 + d_3 + d_4 = 12cm + 6,4cm + 12cm = 30,4cm$$

Der untere Grenzwert der Dicke der Strohschicht beträgt 30,4 cm.

Der Mittelwert aus oberem und unterem Grenzwert der Strohschichtdicke beträgt 30,2 cm. Nachdem die Ergebnisse der Simulationen einer größeren Schwankungsbereite unterliegen und zusätzliche Faktoren wie das Querholz oder die Nägel und Schrauben in der Wand nicht berücksichtigt wurden, wird mit einer Strohschichtdicke von 30 cm gerechnet. Das verändert die Länge der Brücke zwischen den Holzstaffeln von 12 cm auf 6 cm.

8. Simulationen mit Delphin 6

Zur Simulation des Schimmelwachstums wird im ersten Schritt die relative Feuchte der Luft in der Konstruktion betrachtet. Daran erkennt man kritische Schichten, an denen im zweiten Schritt das Isoplethenmodell angewendet werden kann. Im dritten Schritt wird in Bereichen, wo das Ergebnis des Isoplethenmodells aufgrund der Simulationsdauer nicht klar gedeutet werden kann das VTT-Schimmelmodell angewendet. Für beide Modelle wird ein Jahr simuliert. Um die kritischste Zeit des Jahres, nämlich den Winter voll miteinzuberechnen, wird das Jahr von Juni bis Mai betrachtet. Die Einstellungen für das VTT- Schimmelmodell lauten wie folgt:

- Typ des Materials: empfindlich
- Typ der Oberfläche: empfindlich
- Typ der Schimmelrückbildung: relativ geringe Rückbildung

Im vierten Schritt wird die Anzahl der Tage ermittelt, an denen die kritischen relativen Luftfeuchten von 84 % (0,009 % Zerfall je Tag) bzw. 98 % (1,8 - 2,5 % Zerfall je Tag) überschritten werden, um daraus die Lebensdauer ermitteln zu können.

8.1. Lasttragende Strohballenwand

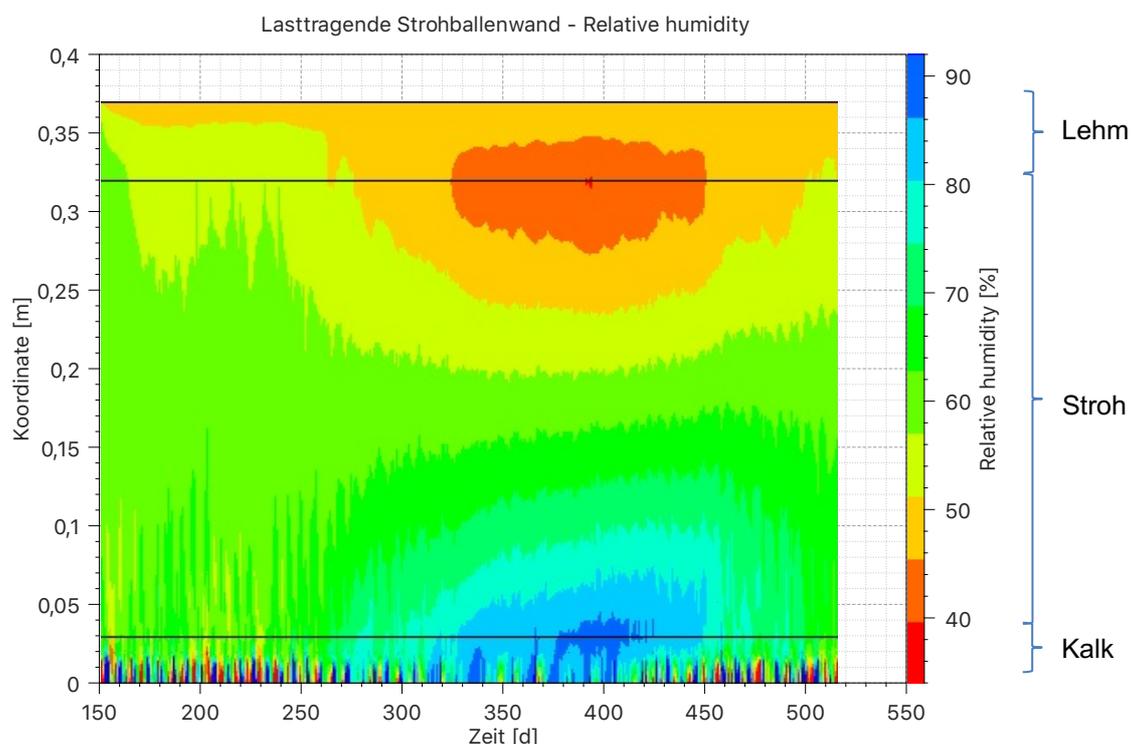


Abb. 9: Relative Luftfeuchtigkeit in einer lasttragenden Strohballenwand

Abbildung 9 zeigt, dass im Winter ganz außen in der Strohschicht eine kritische Menge an relativer Luftfeuchtigkeit auftritt. Um dies weiter zu untersuchen, wird das Isoplethenmodell in 3 cm und 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen angewendet.

8.1.1. Isoplethenmodell

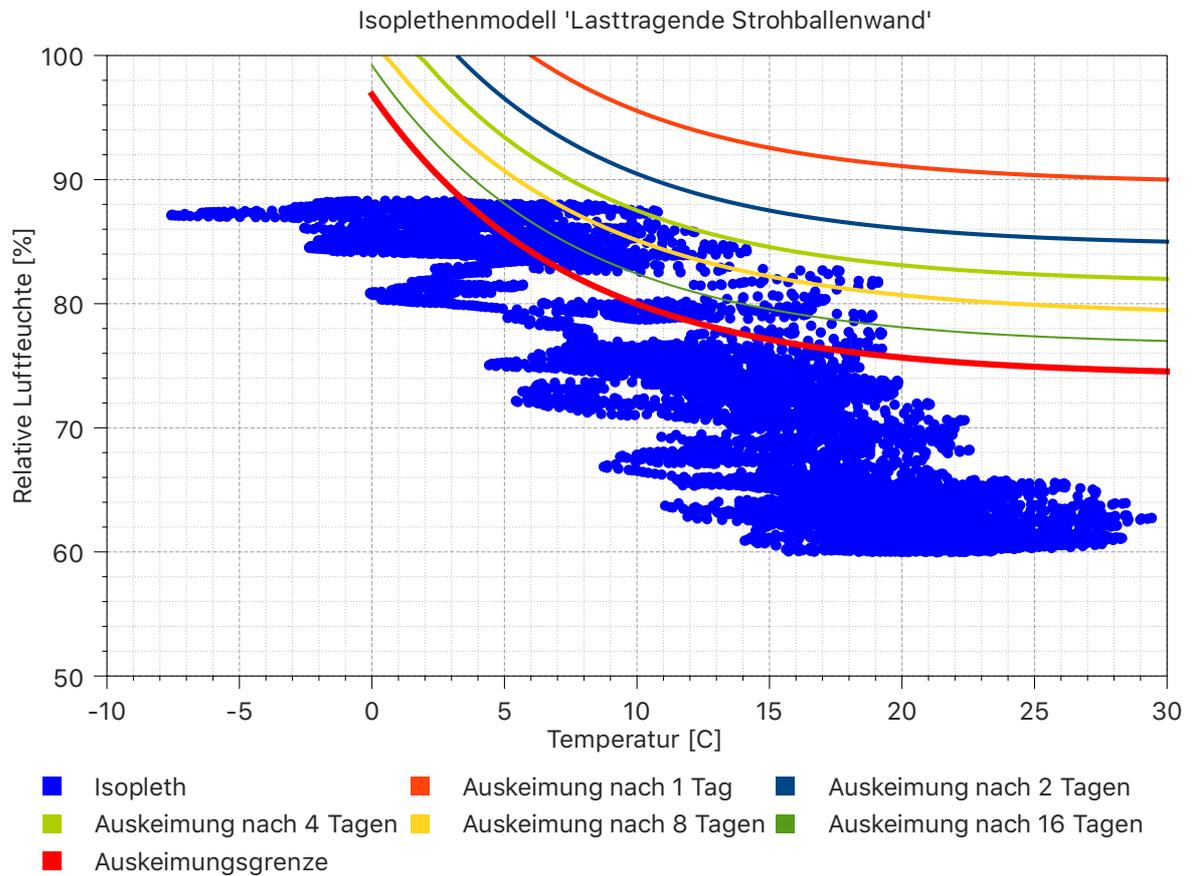


Abb. 10: Isoplethenmodell in 3cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand

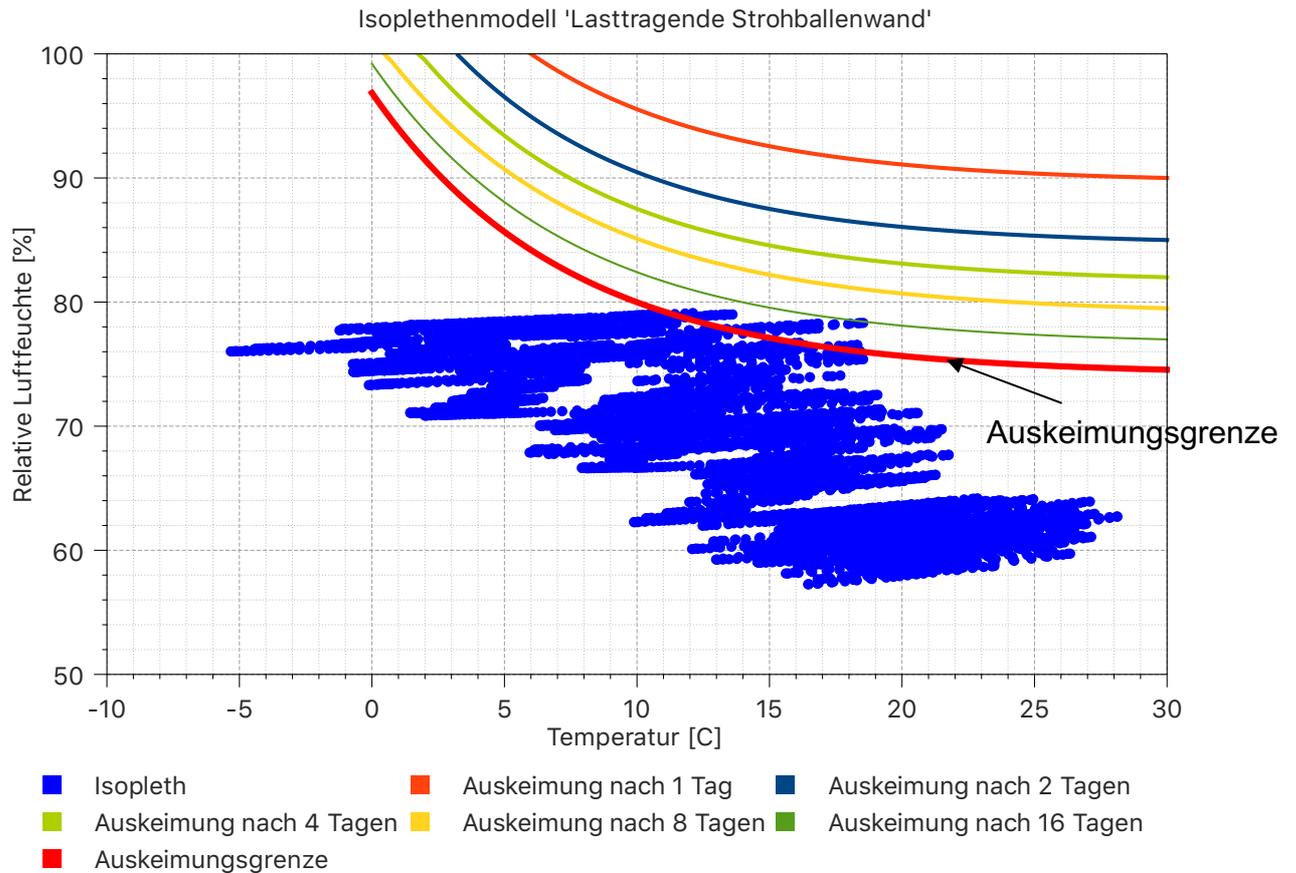


Abb. 11: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand

Die Abbildung 10 zeigt, dass es in 3 cm Tiefe der Strohschicht zu einer Schimmelpilzausbildung kommen könnte. Um diesem Verdacht weiter nachzugehen, wird hier das VTT-Schimmelmodell angewendet.

Aus Abbildung 11 ist ersichtlich, dass in 6 cm Tiefe der Strohschicht nicht mehr mit einem Schimmelpilzwachstum zu rechnen ist. Dazu sind zu wenige Isoplethen über der Auskeimungsgrenze.

8.1.2. VTT-Schimmelmodell

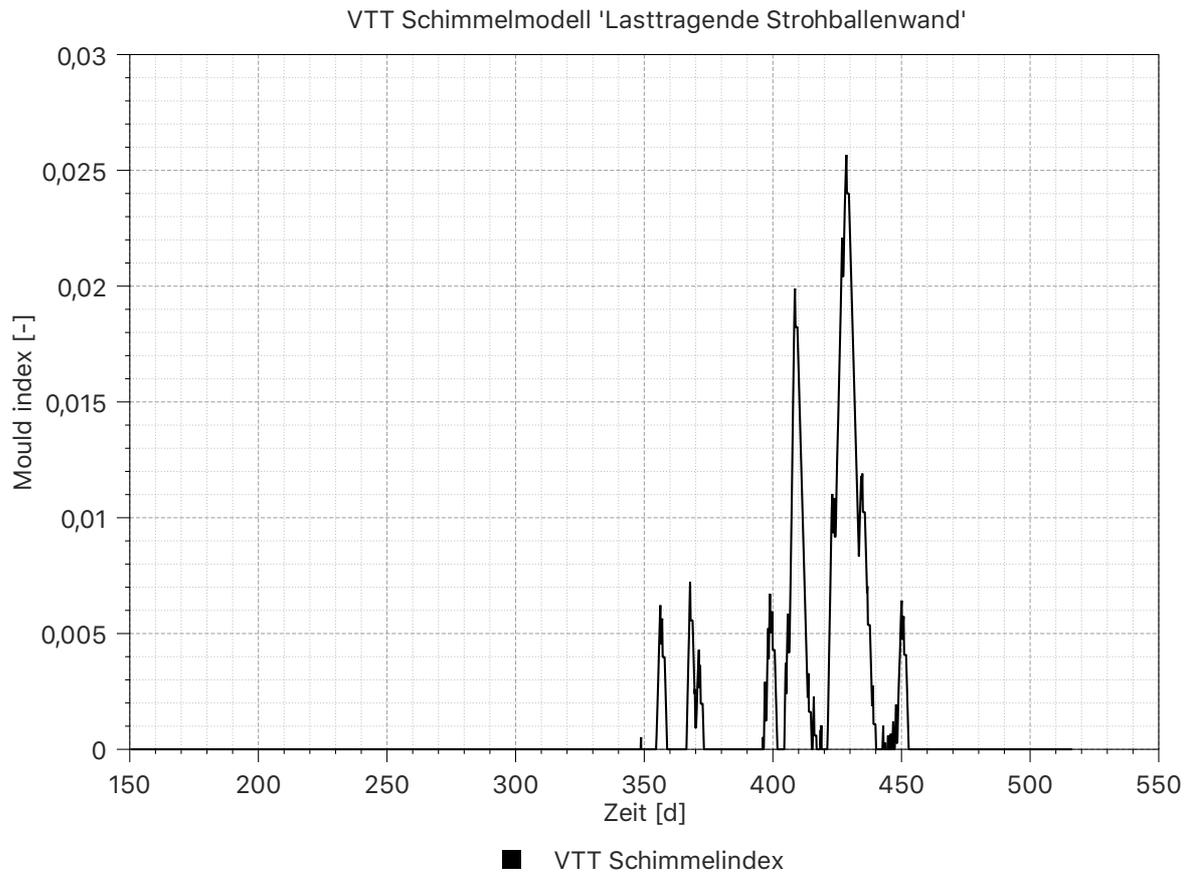


Abb. 12: VTT-Schimmelmodell in 3cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass ein Schimmelwachstum mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, da der Mould Index nur ein Maximum von ca. 0,026 erreicht. Zur Einordnung dieses Wertes hilft ein Blick auf die Tabelle 1 im Kapitel 6.

8.1.3. Berechnung des Zerfalls

Die Tabellenwerte aus Abbildung 9 wurden in Microsoft Excel übertragen. Anschließend wurde herausgefiltert, an wie vielen Tagen im Jahr die relative Luftfeuchtigkeit im Stroh über 84 % bzw. 98 % liegt.

Bis in eine Schichttiefe der Strohschicht von 1,65 cm von außen liegt die relative Luftfeuchtigkeit an 99,5 Tagen im Jahr über 84 %. Bei der Strohschicht zwischen 1,65 cm und 3,1 cm konnte an 40 Tagen im Jahr eine relative Luftfeuchte über 84 % festgestellt werden. Ein Wert über 98 % konnte nicht festgestellt werden.

Daraus resultiert bei einem Zerfall von 0,009 % je Tag ein Zerfall von 0,9 % im Jahr in der ersten Strohschicht (bis 1,65 cm) und 0,36 % im Jahr bei der zweiten Strohschicht (1,65 cm bis 3,1 cm).

Man kann daher annehmen, dass das Stroh in den äußersten 1,65 cm um 0,01485 cm ($= 0,9 \% \cdot 1,65 \text{ cm}$) pro Jahr abnimmt. In der dahinterliegenden Schicht (1,65 cm bis 3,1 cm) zerfallen pro Jahr 0,0052 cm ($= 0,36 \% \cdot 1,45 \text{ cm}$). Insgesamt „schmilzt“ die Wand also um 0,02 cm pro Jahr.

8.1.4. Berechnung der Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Wand entspricht der Dauer, in der die Wand gebrauchstauglich ist. Eine lasttragende Strohballenwand ist nicht mehr gebrauchstauglich, wenn Sie die Lasten nicht mehr aufnehmen kann. Nachdem dieses Wandsystem von außen nach innen zerfällt, lässt sich berechnen wie lange es dauert, bis so viel von der Wand zerfallen ist, dass sie nicht mehr gebrauchstauglich, also nicht mehr tragend ist. Wie im letzten Kapitel errechnet, beträgt die Geschwindigkeit des Zerfalls 0,02 cm pro Jahr. Mit dieser Information kann man umgekehrt die Lebensdauer der Wand bereits in der Planung berücksichtigen. Man müsste eine Wand demnach auf einen Lastfall dimensionieren und dann 0,02 cm für jedes Jahr der Nutzungsdauer addieren. Für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren müsste man deshalb zusätzliche 2 cm Wandstärke berücksichtigen.

Nachdem in dieser Arbeit nur Wandsysteme betrachtet werden und nicht ganze Gebäude, lässt sich keine qualifizierte Aussage über die abzutragenden Lasten

treffen. Außerdem wurde die dieser Berechnung zugrundeliegende Wand nicht auf einen Lastfall dimensioniert, sondern nur um einen gewissen U-Wert zu erreichen. Wie in Kapitel 6 „Berechnung der Lebensdauer“ erwähnt, liegt die Grenze der Gebrauchstauglichkeit bei einer Verschlechterung der Wärmedämmfähigkeit um 10 %. Nachdem die Wand am Beginn der Simulation einen U-Wert von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweist, ist die Grenze der Gebrauchstauglichkeit bei einem U-Wert von $0,165 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht.

$$R_T = \frac{1}{0,165 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 6,06 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$6,06 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - 0,071 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - 0,037 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 5,78 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$5,78 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} * 0,045 \frac{\text{W}}{\text{mK}} = 0,26\text{m}$$

Das Ende der Lebensdauer dieser hypothetischen lasttragenden Strohballenwand ist erreicht, wenn das Stroh nur noch eine Dicke von 26 cm aufweist. Am Beginn ihres erdachten Lebens hatte diese hypothetische Wand eine Strohschichtdicke von 29 cm. Laut dem in Kapitel 8.1.3 erstellten Modell würde es 150 Jahre dauern, bis die Wand das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat.

8.1.5. Verbesserung des Wandaufbaus

Nachdem die im Kapitel 7.1. betrachtete lasttragende Strohballenwand von außen nach innen aufgrund von Feuchtigkeit zerfällt, ist es naheliegend, die Strohschicht von außen besser von Feuchtigkeit zu schützen. Der Versuch, den Feuchteschutz mit einer dickeren Kalkschicht zu erreichen, ist in der Simulation gescheitert. Danach wurde versucht, den Feuchteschutz durch eine feuchteregulierende 3 cm starke Lehmschicht zwischen Kalk und Stroh zu erreichen. Das simulierte Luftfeuchteprofil auf Abbildung 13 verspricht gute Ergebnisse. Der dunkelblaue Bereich, der eine relative Luftfeuchtigkeit über 85 % markiert, konnte deutlich verkleinert werden.

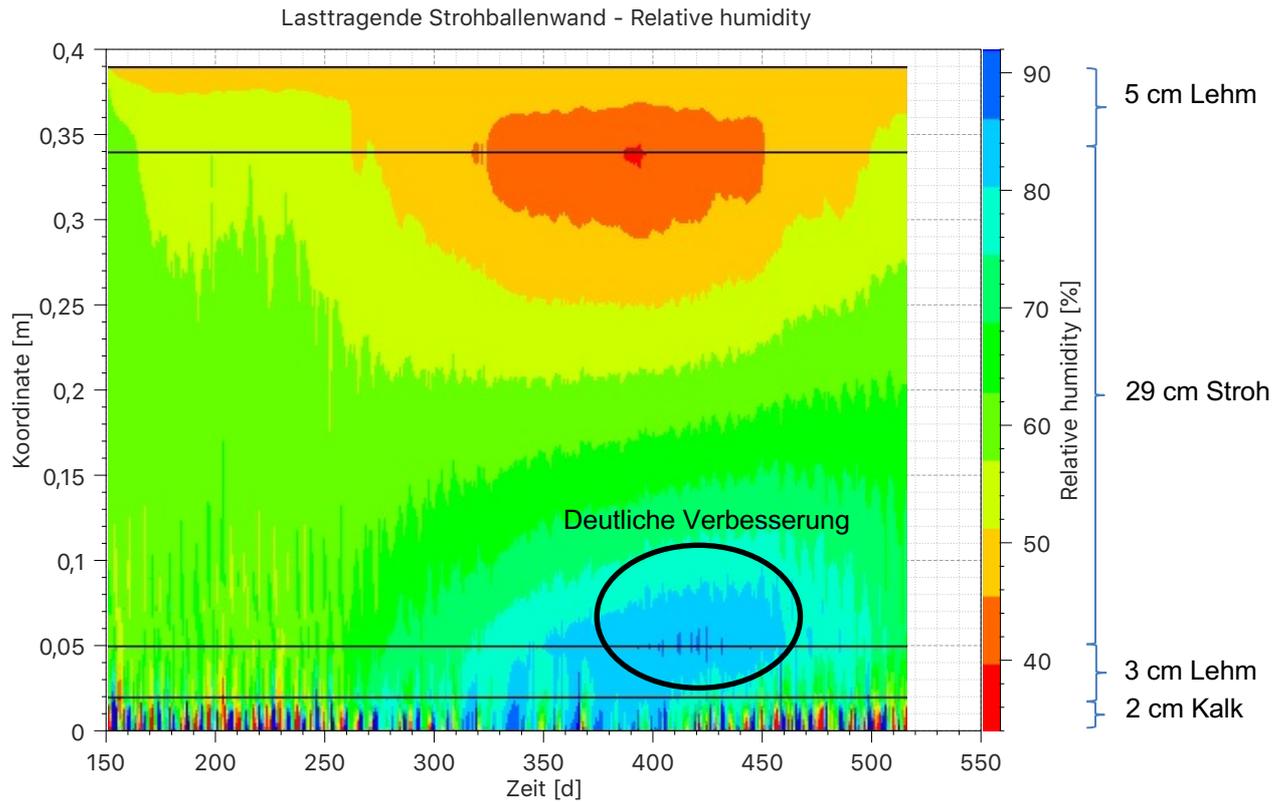


Abb. 13: Relative Luftfeuchtigkeit in einer verbesserten lasttragenden Strohballenwand

Eine Überprüfung des Datensatzes mit Microsoft Excel hat ergeben, dass die Tage, an denen die relative Luftfeuchtigkeit in der ersten Strohschicht (bis 1,7 cm) über 84 % liegt von 99,5 auf 72 Tage reduziert werden konnte. In der zweiten Strohschicht (1,7 cm bis 3,1 cm von außen) konnte die Anzahl dieser Tage von 40 auf 21 reduziert werden. Über beide Wandschichten hinweg konnte der Zerfall damit von 0,02 cm auf 0,013 cm pro Jahr reduziert werden. Das entspricht einer Erweiterung der Nutzungsdauer dieser Wand von 150 Jahren auf 230 Jahre.

8.2. Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

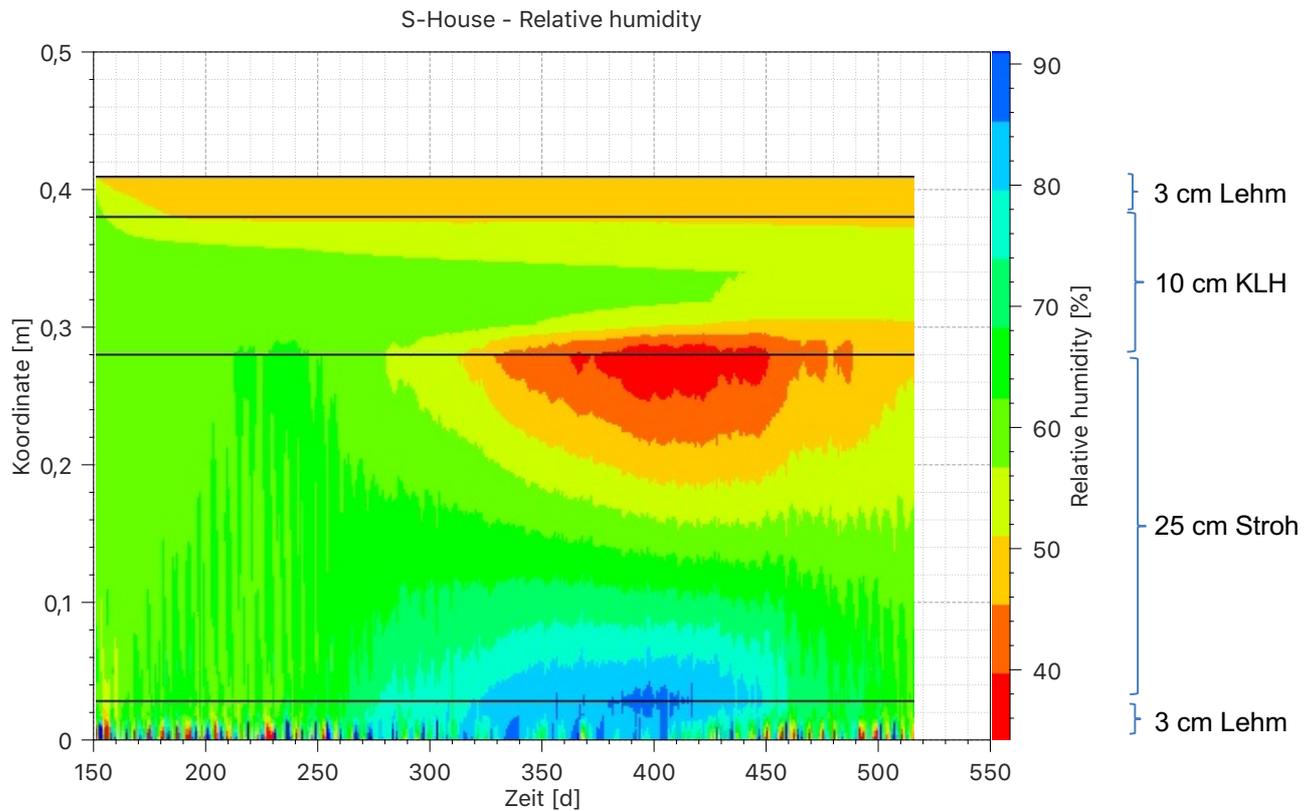


Abb. 14: Relative Luftfeuchtigkeit über ein Jahr in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene. Am dunkelblauen Bereich in der äußeren Strohschicht um den Tag 400 ist zu erkennen, dass hier eine erhebliche relative Luftfeuchtigkeit anfällt. Um das Schimmelpilzwachstum hier untersuchen zu können, werden im folgenden Kapitel das Isoplethenmodell in 1 cm, 3 cm und 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen angewendet.

8.2.1. Isolethenmodell

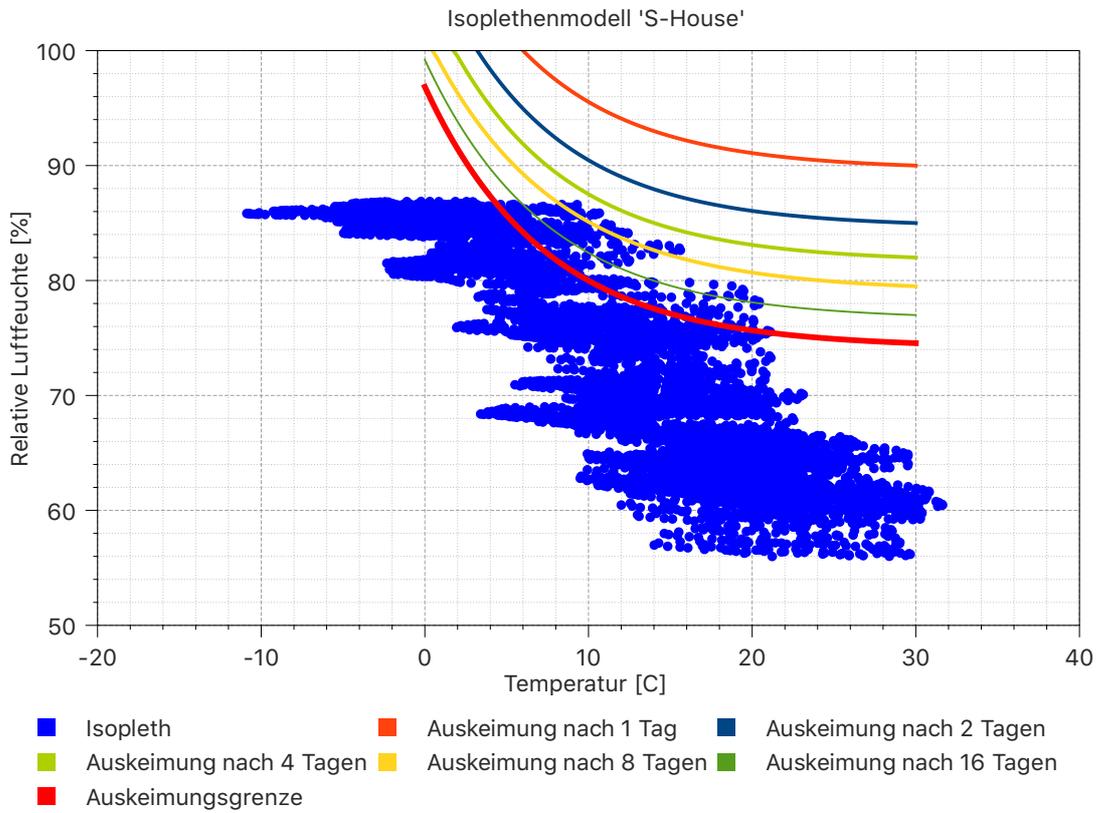


Abb. 15: Isolethenmodell in 1 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

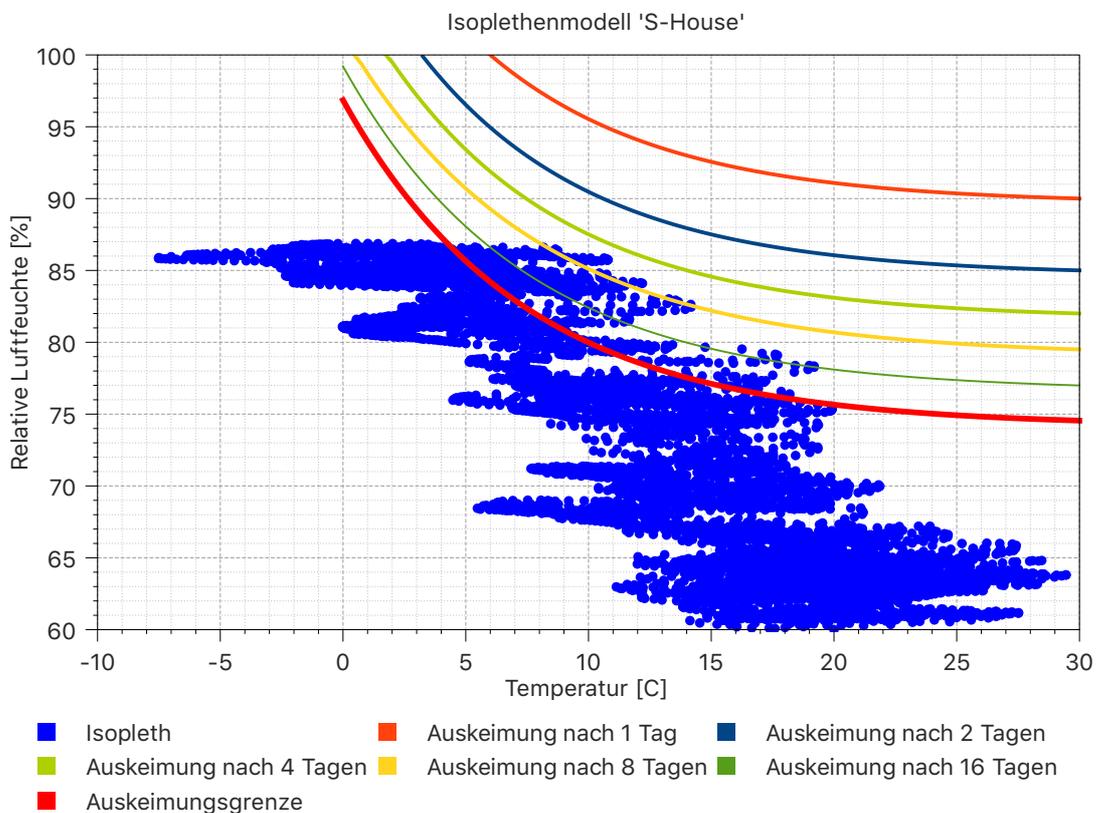


Abb. 16: Isolethenmodell in 3 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

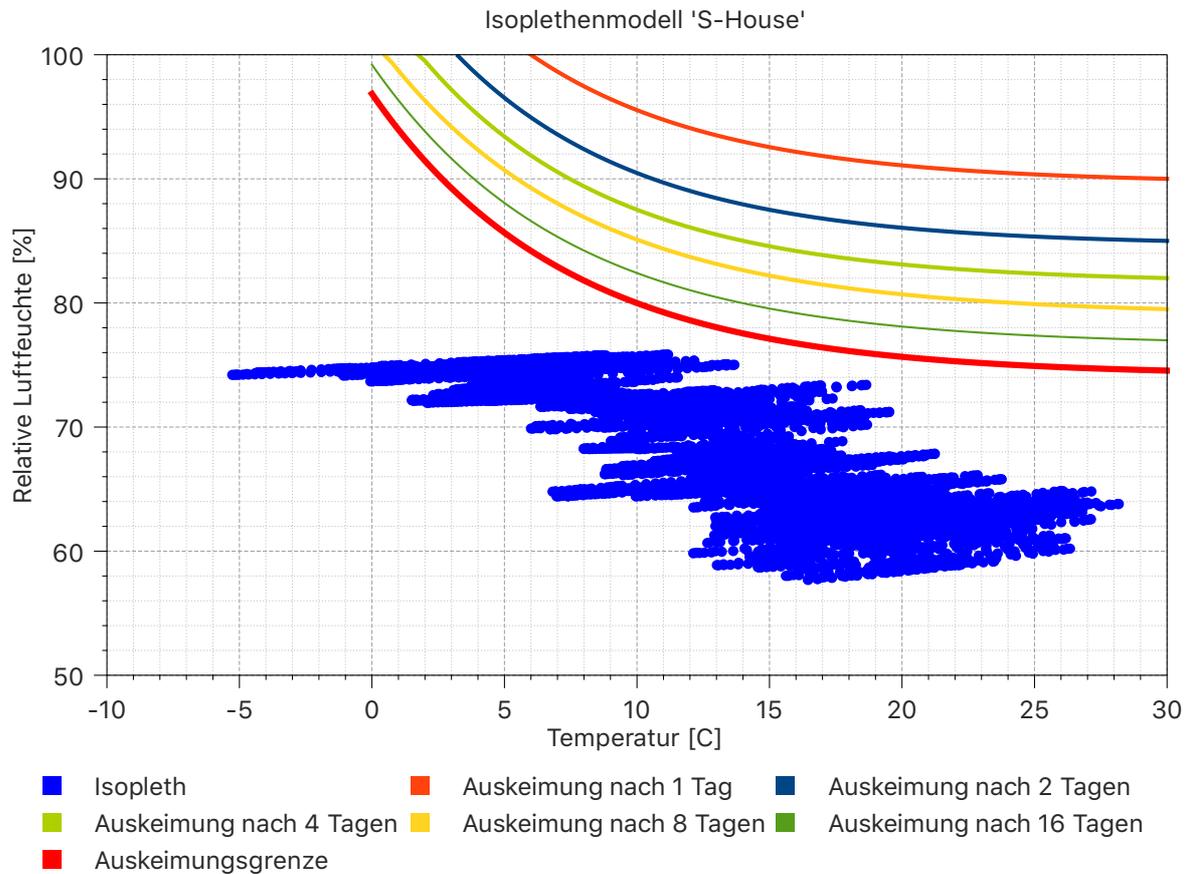


Abb. 17: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

Die Abbildungen 15, 16 und 17 zeigen das Isoplethenmodell in 1, 3 und 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen. Man erkennt einen deutlichen Abfall der Schimmelwahrscheinlichkeit zwischen 3 und 6 cm Tiefe. In den ersten beiden Diagrammen ist kaum ein Unterschied feststellbar. Zu näheren Untersuchungen werden die Ergebnisse aus Abbildung 15 und Abbildung 16 näher mit dem VTT-Schimmelmodell betrachtet.

8.2.2. VTT-Schimmelmodell

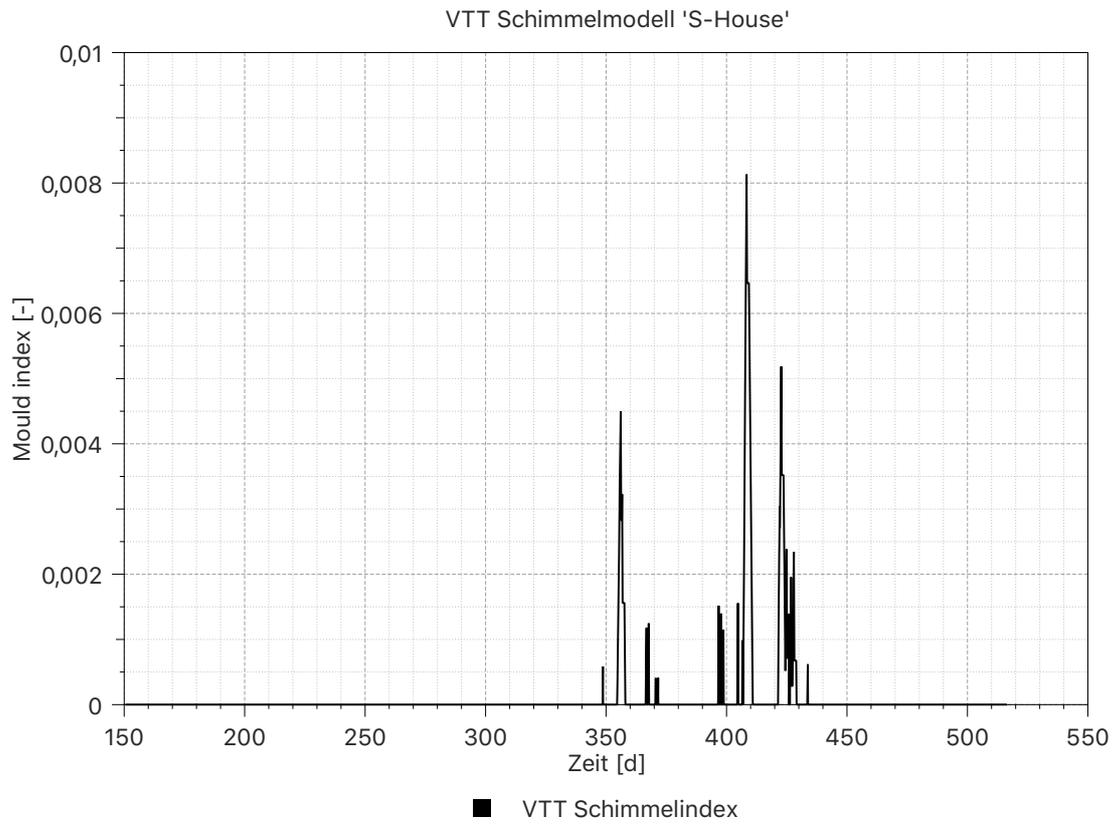


Abb. 18: VTT-Schimmelmodell in 1 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

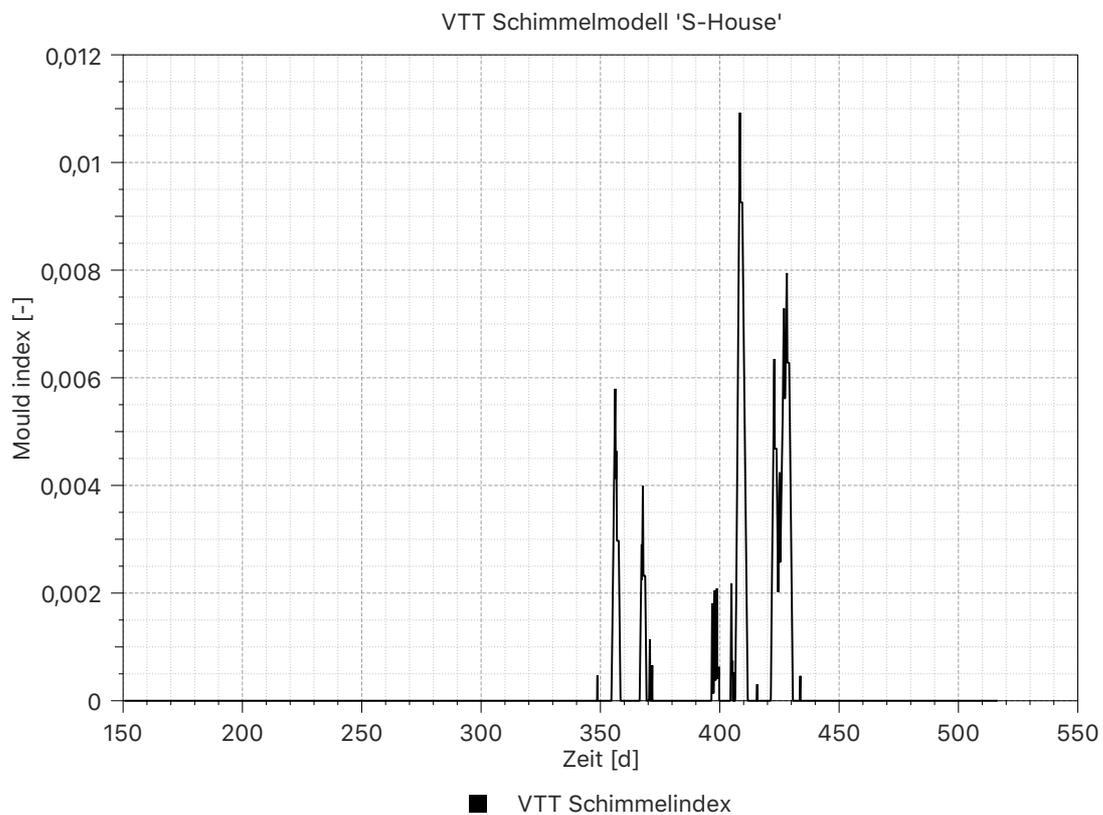


Abb. 19: VTT-Schimmelmodell in 3 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene

Das VTT-Schimmelmodell wird in 1 cm Tiefe der Strohschicht von außen angewendet. Auf den Diagrammen auf den Abbildungen 18 und 19 ist zu erkennen, dass Schimmelpilzwachstum auch bei diesem Wandaufbau ausgeschlossen werden kann. Der Schimmelindex erreicht nur ein Maximum von etwa 0,008 in 1 cm und 0,011 in 3 cm Tiefe. Interessant ist dabei, dass das Schimmelpilzwachstum weiter innen größer ist – wenn auch nur geringfügig.

8.2.3. Berechnung des Zerfalls

Die Tabellenwerte aus Abbildung X wurden mittels Microsoft Excel analysiert. Es wurde herausgefiltert, an wie vielen Tagen im Jahr die relative Luftfeuchtigkeit im Stroh über 84 % bzw. 98 % liegt.

Bis in eine Schichttiefe von 1,65 cm von außen liegt die relative Luftfeuchtigkeit an 78 Tagen im Jahr über 84 %. Bei der Strohschicht zwischen 1,65 cm und 3,1 cm konnte nur an einem halben Tag im Jahr eine relative Luftfeuchte über 84 % festgestellt werden. Ein Wert über 98 % konnte nicht festgestellt werden.

Daraus resultiert bei einem Zerfall von 0,009 % je Tag ein Zerfall von 0,7 % im Jahr in der ersten Strohschicht (bis 1,65 cm) und 0,004 % im Jahr bei der zweiten Strohschicht (1,65 cm bis 3,1 cm). Der Zerfall in der zweiten Strohschicht ist vernachlässigbar.

Man kann daher annehmen, dass das Stroh um 0,012 cm ($= 0,7 \% * 1,65 \text{ cm}$) pro Jahr abnimmt.

8.2.4. Berechnung der Lebensdauer

Wie in Kapitel 6 „Berechnung der Lebensdauer“ erwähnt, liegt die Grenze der Gebrauchstauglichkeit bei einer Verschlechterung der Wärmedämmfähigkeit um 10%. Nachdem die Wand am Beginn der Simulation einen U-Wert von 0,15 W/m²K aufweist, ist die Grenze der Gebrauchstauglichkeit bei einem U-Wert von 0,165 W/m²K erreicht.

$$R_T = \frac{1}{0,165 \frac{W}{m^2K}} = 6,06 \frac{m^2K}{W}$$

$$6,06 \frac{m^2K}{W} - 0,043 \frac{m^2K}{W} - 0,769 \frac{m^2K}{W} - 0,043 \frac{m^2K}{W} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} = 5,04 \frac{m^2K}{W}$$

$$5,04 \frac{m^2K}{W} * 0,045 \frac{W}{mK} = 0,23m$$

Das Ende der Lebensdauer der Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene ist erreicht, wenn das Stroh nur noch eine Dicke von 23 cm aufweist. Am Beginn ihres erdachten Lebens hatte diese Wand eine Strohschichtdicke von 26 cm. Nach dem in Kapitel 8.2.3 erstellten Modell würde es 250 Jahre dauern, bis die Wand das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat. Das entspricht einer deutlichen Überlegenheit gegenüber den andern untersuchten Wandkonstruktionen. Der Grund dafür liegt in der außenliegenden Lehmschicht. Lehm absorbiert Wasser aus der Luft, wenn die Luftfeuchtigkeit sehr hoch ist und gibt dieses Wasser langsam wieder ab, wenn auch die Umgebungsluftfeuchte dies wieder zu zulässt.

8.2.5. Verbesserung des Wandaufbaus

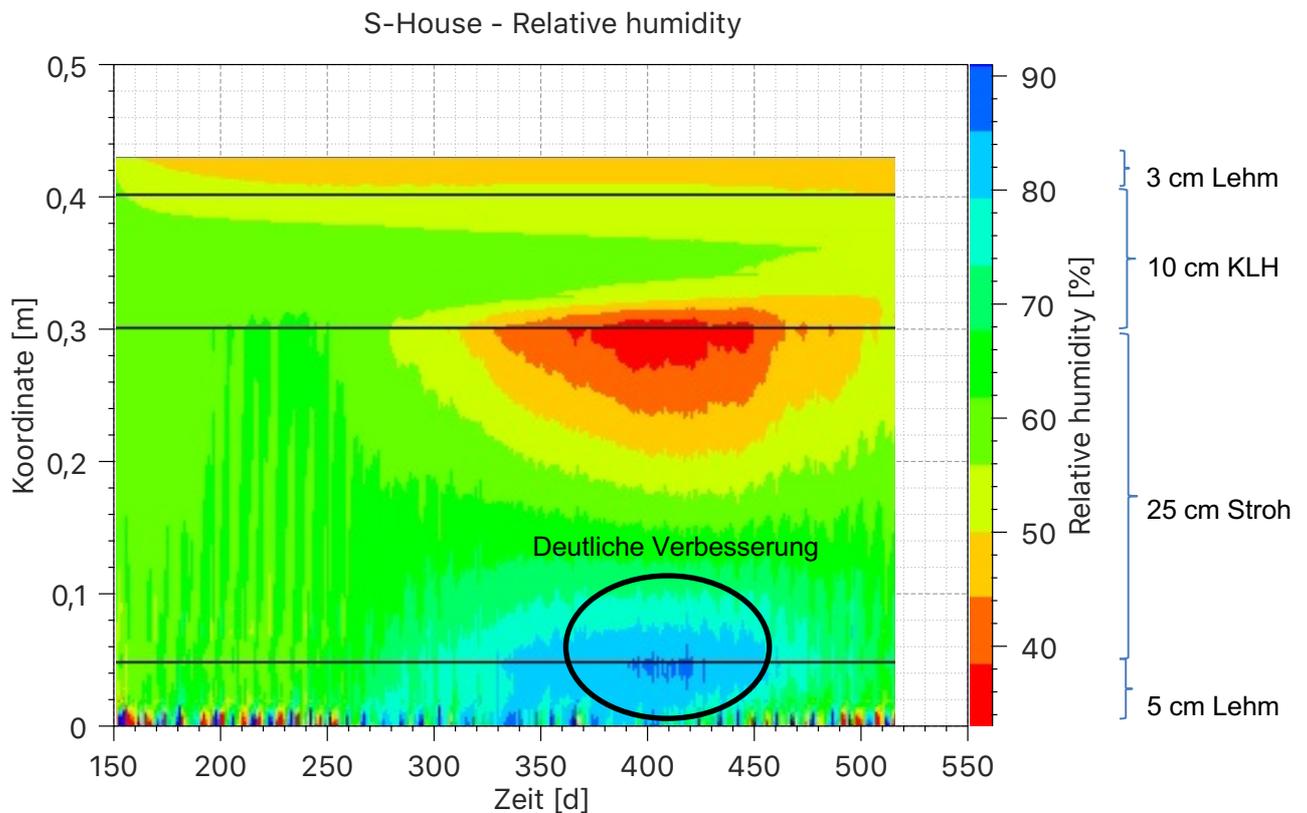


Abb. 20: Relative Luftfeuchtigkeit über ein Jahr in einer verbesserten Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmeben

Für den verbesserten Wandaufbau wurde die außenliegende Lehmschicht um 2 cm auf 5 cm erhöht. Wie man auf Abbildung 20 sieht, bringt das eine deutliche Verbesserung des Feuchteverhaltens in der Strohschicht mit sich. Eine Analyse der Daten ergab eine Verringerung der Tage, an denen die relative Luftfeuchte in den äußersten 1,65 cm der Strohschicht über 84 % liegt, von 78 Tagen auf 51 Tage. Weiter innen konnte eine Überschreitung des Grenzwertes der relativen Luftfeuchtigkeit nicht mehr nachgewiesen werden. Damit sinkt die Rate des Zerfalls in der äußersten Strohschicht auf 0,46 % im Jahr. Das entspricht einer Verlängerung der Lebensdauer von 250 Jahren auf 395 Jahre.

8.3. Ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion

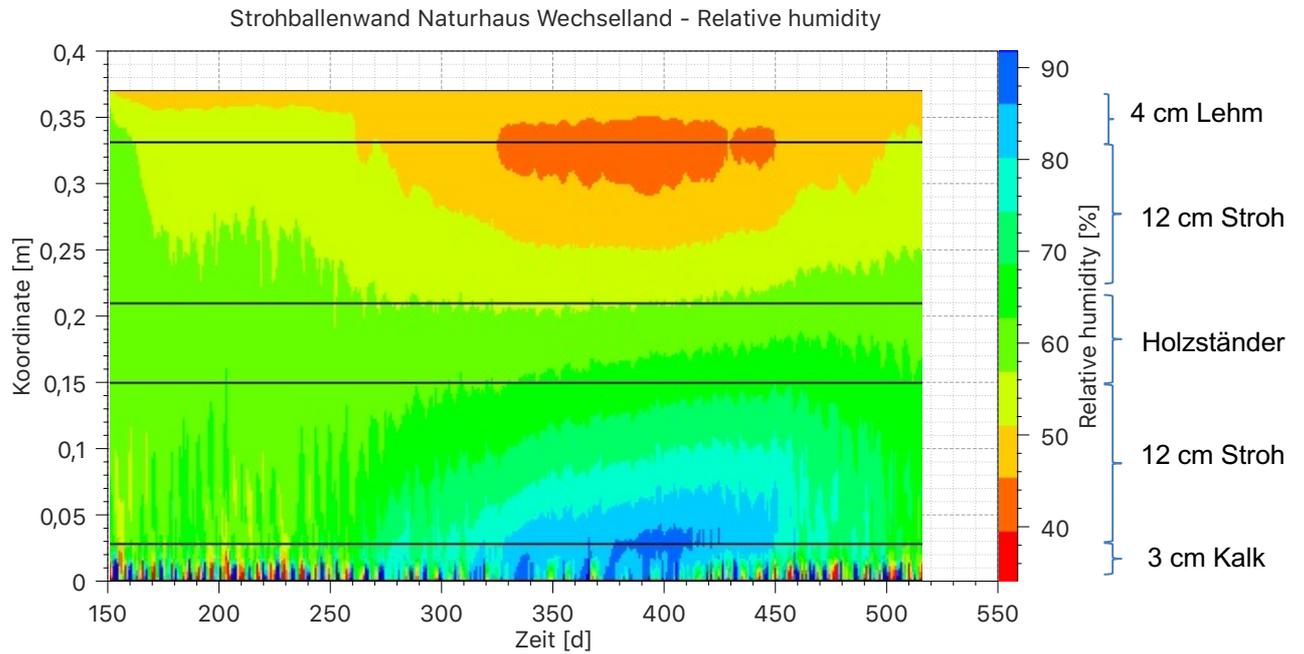


Abb. 21: Y-Schnitt in 80 cm Höhe durch Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

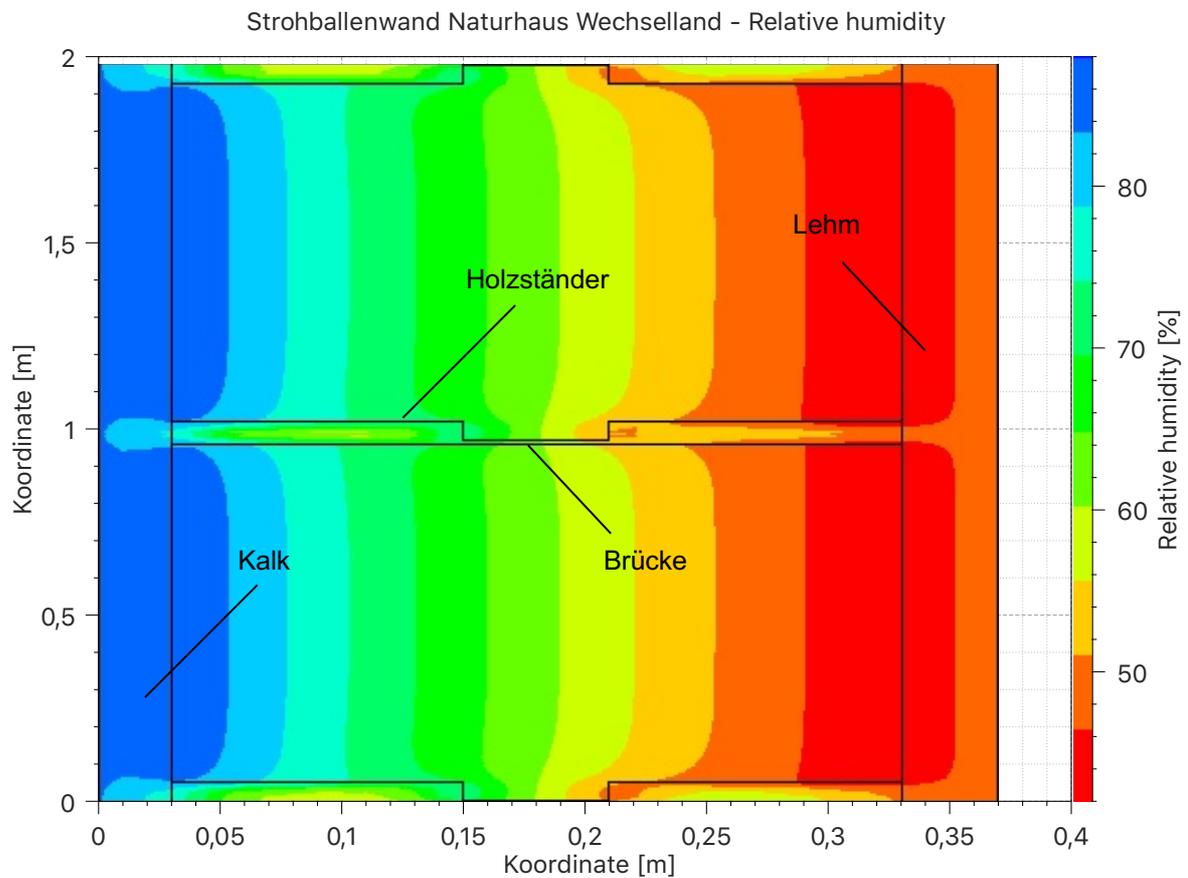


Abb. 22: Zeit-Schnitt durch Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland am Tag 400

Abbildung 21 zeigt nicht den gesamten Wandaufbau. Es handelt sich um einen Y-Schnitt durch die Konstruktion. Man kann erkennen, dass es im Bereich um Tag 400 zu einer großen Menge an relativer Luftfeuchtigkeit im äußeren Bereich der Strohschicht kommt. Zur näheren Untersuchung zeigt Abbildung 22 einen Zeitschnitt am Tag 400 durch die gesamte Wandkonstruktion. Die größte relative Luftfeuchtigkeit ist in der Kalk- sowie in der äußersten Strohschicht zu verzeichnen.

8.3.1. Isoplethenmodell

Zur näheren Untersuchung des Schimmelwachstums wurde in 1, 3 und 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen das Isoplethenmodell angewendet. Auf den Abbildungen 23, 24 und 25 sieht man, dass die Wahrscheinlichkeit für Schimmelwachstum von außen nach innen abnimmt. In 6 cm Tiefe der Strohschicht ist nicht mehr mit Schimmelwachstum zu rechnen.

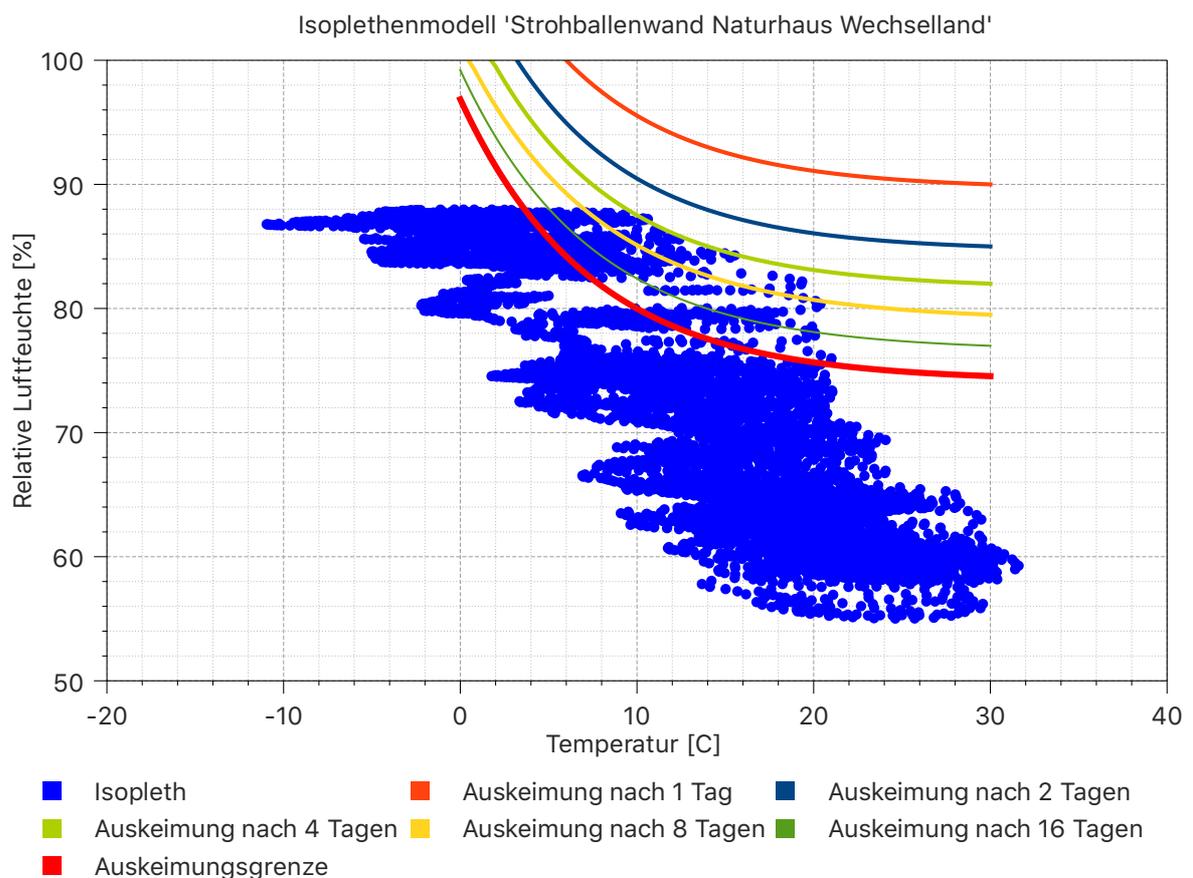


Abb. 23: Isoplethenmodell in 1 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

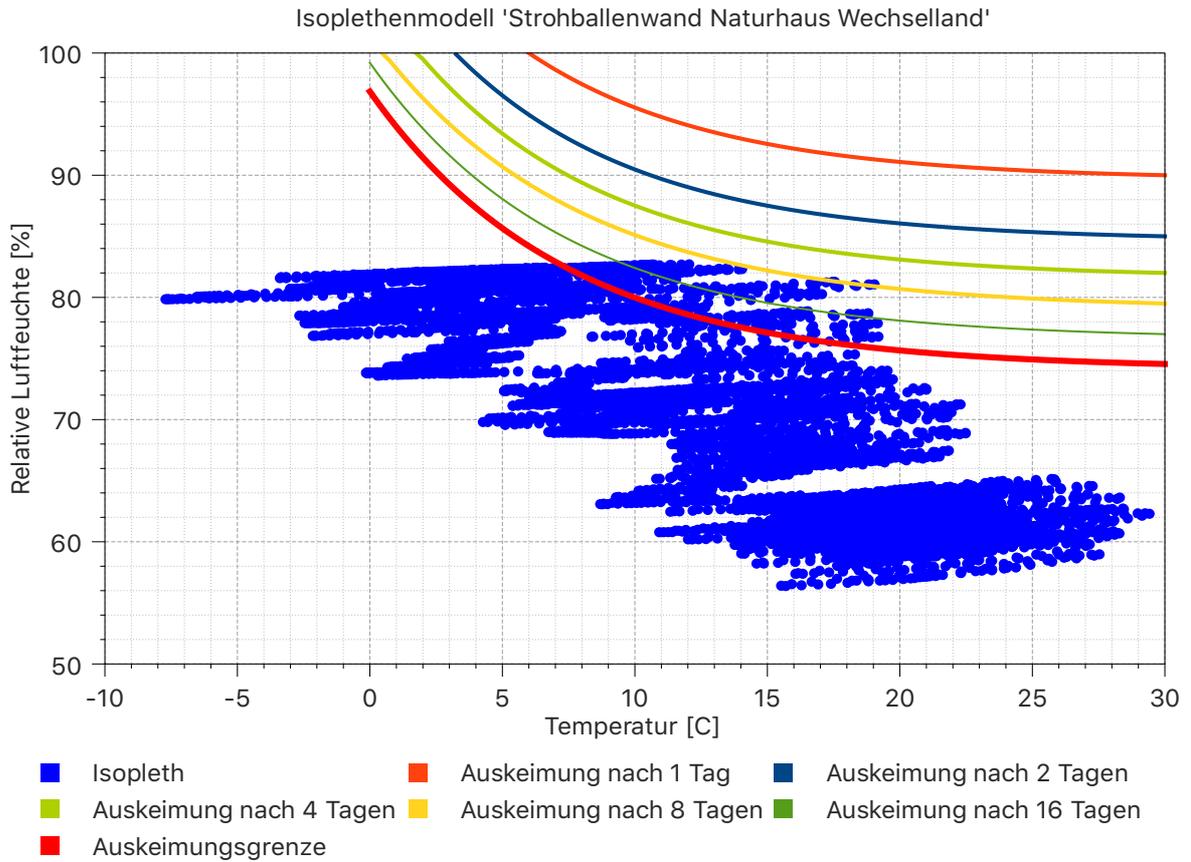


Abb. 24: Isoplethenmodell in 3 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

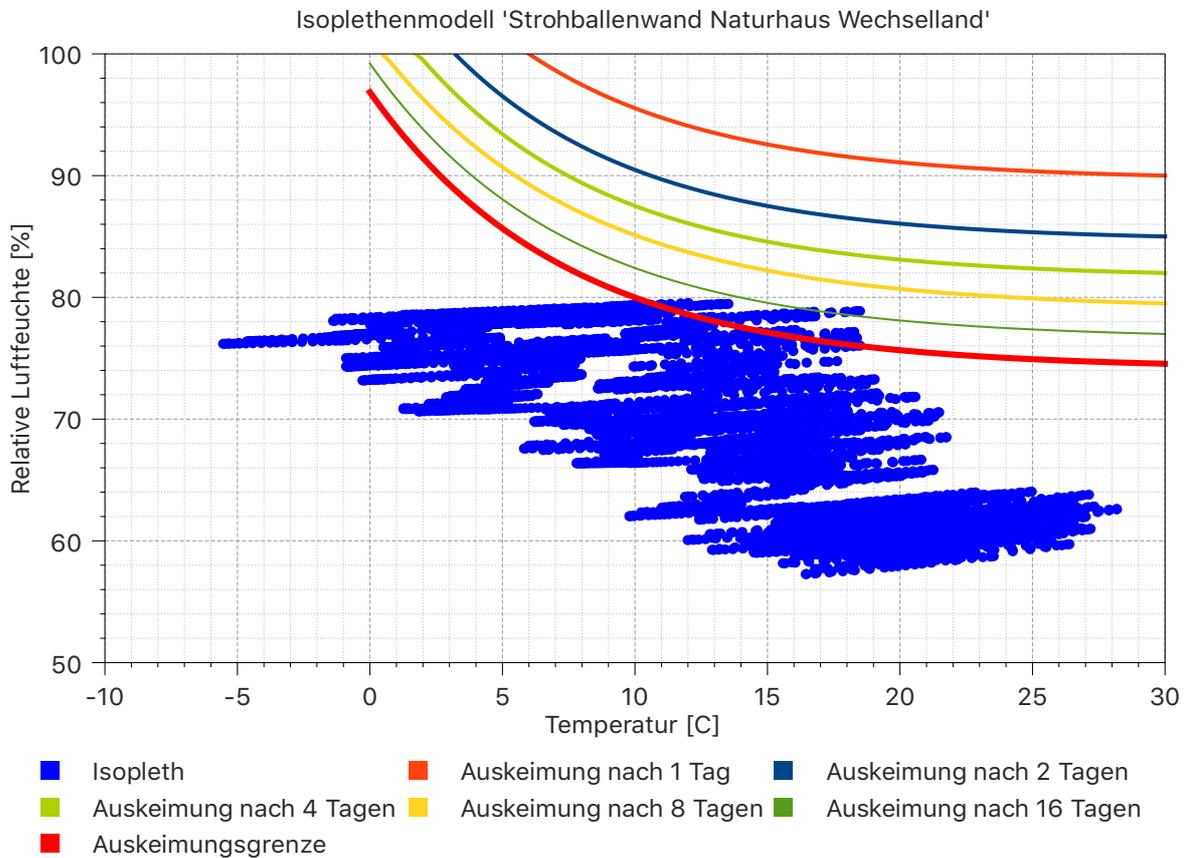


Abb. 25: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

8.3.2. VTT-Schimmelmodell

Das VTT-Schimmelmodell wird in 1 cm und 3 cm Tiefe der Strohschicht von außen angewendet. Auf den Diagrammen auf den Abbildungen 26 und 27 ist zu erkennen, das Schimmelpilzwachstum auch bei diesem Wandaufbau ausgeschlossen werden kann. Der Mould index erreicht nur ein Maximum von etwa 0,013 in 1 cm Tiefe. In 3 cm Tiefe sind es gar nur 0,0028.

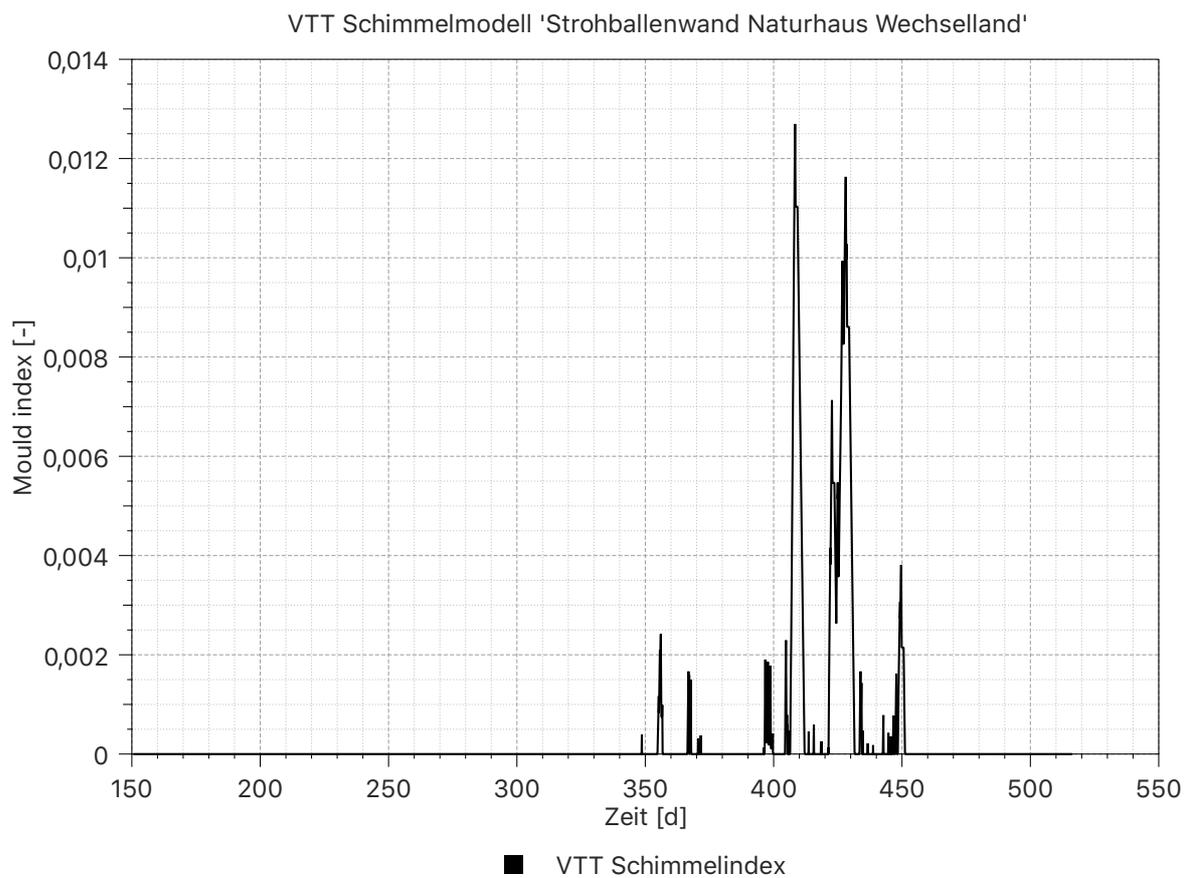


Abb. 26: : VTT- Schimmelmodell in 1 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

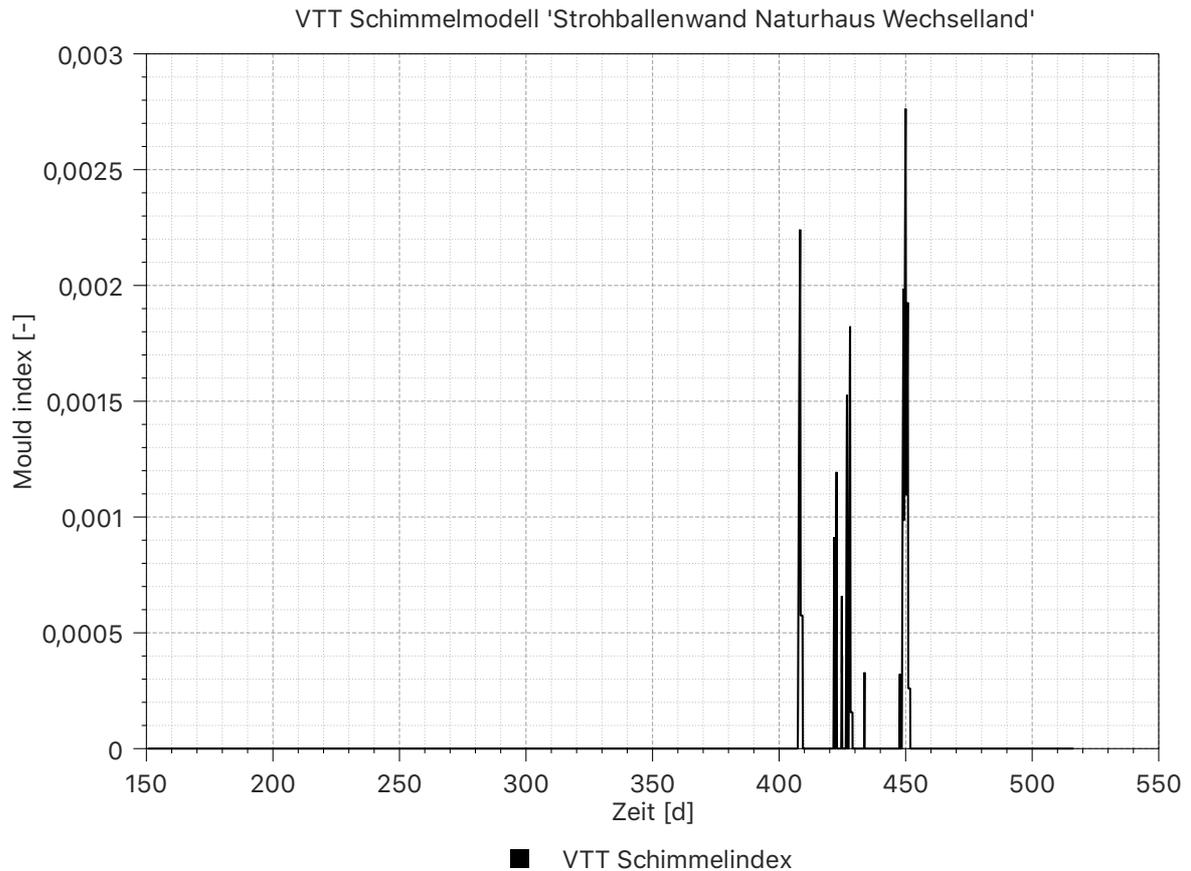


Abb. 27: VTT- Schimmelmodell in 3 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

8.3.3. Berechnung des Zerfalls

Wie bei den anderen Wandaufbauten wurden die Tabellenwerte aus Abbildung 21 in Microsoft Excel übertragen. Anschließend wurde herausgefiltert, an wie vielen Tagen im Jahr die relative Luftfeuchtigkeit im Stroh über 84 % bzw. 98 % liegt.

Bis in eine Schichttiefe von 1,65 cm von außen liegt die relative Luftfeuchtigkeit an 84,4 Tagen im Jahr über 84 %. Bei der Strohschicht zwischen 1,65 cm und 3,1 cm konnte an 38,7 Tagen im Jahr eine relative Luftfeuchte über 84 % festgestellt werden. Ein Wert über 98 % konnte nicht festgestellt werden.

Daraus resultiert bei einem Zerfall von 0,009 % je Tag ein Zerfall von 0,76 % im Jahr in der ersten Strohschicht (bis 1,65 cm) und 0,35 % im Jahr bei der zweiten Strohschicht (1,65 cm bis 3,1 cm).

Man könnte daher annehmen, dass das Stroh in den äußersten 1,65 cm um 0,01254 cm (= 0,76 % * 1,65 cm) pro Jahr abnimmt. In der dahinterliegenden Schicht (1,65

cm bis 3,1 cm) zerfallen pro Jahr 0,0052 cm (= 0,36 % * 1,45 cm). Insgesamt kann daher behauptet werden, dass die Wand 0,018 cm pro Jahr verliert.

8.3.4. Berechnung der Lebensdauer

Wie im letzten Kapitel errechnet, beträgt die Geschwindigkeit des Zerfalls 0,018 cm pro Jahr. Mit dieser Information kann man die Lebensdauer der Wand in der Planung berücksichtigen. Für jedes Jahr der Nutzungsdauer müssen 0,018 cm addiert werden. Für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren müsste man daher zusätzliche 1,8 cm Wandstärke berücksichtigen.

Zur Bestimmung der Gebrauchstauglichkeit zufolge um 10 % verringertem Wärmedämmvermögen muss auch hier die Stärke der übrigbleibenden Strohschichtdicke ermittelt werden. Nachdem in der Berechnung der Strohschichtdicke in Kapitel 7.1.2 der obere Grenzwert der Dicke der Strohschicht herangezogen wurde, wird auch hier mit diesem Verfahren gerechnet.

$$R_T = \frac{1}{0,165 \frac{W}{m^2K}} = 6,06 \frac{m^2K}{W}$$

$$\frac{1}{\frac{0,01}{3,03 \frac{m^2K}{W}} + \frac{0,05}{4,78 \frac{m^2K}{W}} + \frac{0,94}{R_{T3}}} = 6,06 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{T3} = 6,2 \frac{m^2K}{W}$$

$$6,2 \frac{m^2K}{W} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,06 \frac{m^2K}{W} - 2,5 \frac{m^2K}{W} - 2,5 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} = 0,79 \frac{m^2K}{W}$$

$$0,79 \frac{m^2K}{W} * 0,045 \frac{W}{mK} = 0,27m$$

Bei einer Strohschichtdicke von 30 cm liegt der U-Wert bei 0,15 W/(m²K). Mit der Verschlechterung des U-Wertes um 10 % geht die Strohschichtdicke auf 27 cm zurück. Auch hier ist das Ende der Fahnenstange bei einer Verringerung der Strohschichtstärke um 3 cm erreicht. Gemäß den Berechnungen von Kapitel 8.2.3 dauert es ca. 167 Jahre, bis die ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion nicht mehr zu gebrauchen ist.

8.3.5. Verbesserung des Wandaufbaus

So wie schon bei der lasttragende Strohballenwand, die auch von außen nach innen aufgrund von Feuchtigkeit zerfällt, ist es naheliegend, die Strohschicht von außen besser vor Feuchtigkeit zu schützen. In diesem Fall wurde erneut eine Simulation mit einer 4 cm dicken Lehmschicht zwischen Kalk und Stroh gemacht. Wieder konnte eine deutliche Verbesserung erreicht werden.

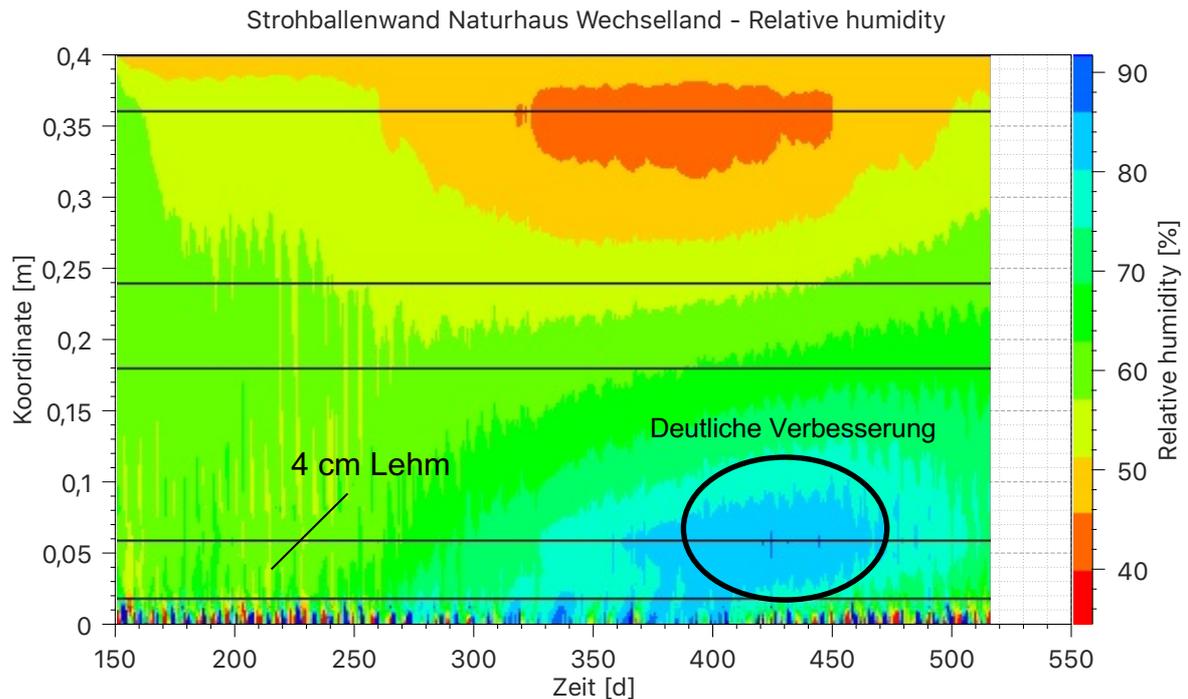


Abb. 28: Y-Schnitt in 80 cm Höhe durch verbesserten Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland

Mit einer erneuten Auswertung der Daten konnte bewiesen werden, dass sich die Anzahl der Tage, an denen in der ersten Strohschicht (bis 1,65 cm) über 84 % relative Luftfeuchtigkeit anfallen, von 84,4 Tagen auf 62 Tage verringert wurde. In dahinterliegenden Strohschichten liegt die relative Luftfeuchtigkeit nie über 84 %. Damit konnte der Zerfall von 0,018 cm pro Jahr auf 0,009 cm pro Jahr reduziert werden. Das entspricht einer Verbesserung der Lebensdauer um 100 %. Statt 167 Jahre kann diese Wand nun 333 Jahre lang bestehen.

9. Diskussion

Mit dieser Arbeit konnte bestätigt werden, dass die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial deutlich über den erforderlichen 50 Jahren für gewöhnliche Gebäude liegt. Auch der Beweis, dass monumentale Gebäude mit einer Lebensdauer von 100 Jahren aus Stroh erbaut werden können, wurde erbracht. Wie historische, aus Stroh gebaute Gebäude zeigen, kann diese Aussage bestätigt werden. Zu bedenken ist hier jedoch, dass diese Arbeit nur Rückschlüsse über die Verwendung von Stroh in Wandkonstruktionen zulässt.

Die Simulationen wurden für den Standort Wien erstellt. Unter anderen klimatischen Bedingungen sehen die Ergebnisse wahrscheinlich anders aus. Besonders feuchtes Klima mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit, wie es in Österreich im Winter vorkommt, scheint dem Stroh zuzusetzen. Bei dem Klimadatenfile, das für die Simulationen in dieser Arbeit verwendet wurde, handelt es sich um einen halbsynthetischen Datensatz, in dem die Daten über 30 Jahre gemittelt wurden. Die Einflüsse des Klimawandels wurden nicht berücksichtigt.

Viele Einflüsse konnten in den Simulationen nicht berücksichtigt werden. Neben dem Klimawandel zählen zu diesen Einflüssen beispielsweise Luftbewegung, Regen oder Spritzwasser, Wartung des Bauwerks oder Nägel und andere Metallteile in der Wandkonstruktion.

Die Lebensdauer von Stroh als Baumaterial ist wie im Kapitel 6 bereits erwähnt, abhängig von den Grenzwerten der Gebrauchstauglichkeit. Für diese Arbeit wurde diese Grenze mit einer Verringerung des Wärmedurchgangswiderstandes um 10 % definiert. Sämtliche in dieser Arbeit simulierten Wandaufbauten wurden auf einen U-Wert von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ getrimmt, um vergleichbar zu sein. Dabei wurde jeder Wandaufbau schlanker gemacht, als er in Wirklichkeit gebaut werden würde. Das heißt, dass alle diese Wände eigentlich einen U-Wert von $0,1$ bis $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aufweisen würden. Wenn eine Wand einen U-Wert von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ hat, bedeutet eine Verringerung um 10 % einen U-Wert von $0,165 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, was immer noch sehr gut ist. Die Grenze der Gebrauchstauglichkeit mit einer Verringerung des Wärmedurchgangswiderstandes um 10 % zu definieren kann daher hinterfragt werden. Würde man diese Grenze höher setzen, würde sich damit automatisch die Lebensdauer des Strohs erhöhen.

10. Conclusio

Stroh ist ein Baumaterial, das sich mit seiner Lebensdauer nicht vor anderen Baumaterialien verstecken muss. Ganz im Gegenteil. Mit seinen Eigenschaften hat es das Potential über hunderte Jahre hinweg gute Dienste zu leisten.

Alle in dieser Arbeit betrachteten Wandsysteme hatten dieselbe Schadensanfälligkeit. Das Stroh beginnt bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit von außen nach innen zu zerfallen. Eine feuchtigkeitsausgleichende Lehmschicht außen auf dem Stroh hat sich über alle Simulationen hinweg bewährt, um die Nutzungsdauer der Konstruktionen deutlich zu erhöhen. Der Feuchteschutz von außen kann auch anders und vielleicht sogar effizienter als mit Lehm vonstatten gehen. Lehm wurde gewählt, weil es bei vielen „Strohhäusern“ sowieso verwendet wird und ein sehr ökologisches Baumaterial ist, das in großen Mengen und fast überall auf der Welt verfügbar ist.

Seine bauphysikalischen Besonderheiten, wie das Dämmvermögen oder der Einsatz als konstruktives Baumaterial weisen auf großes Potential in der Baubranche hin.

In einer Welt, in der wir Menschen keine andere Wahl haben, als sämtliche Bereiche unseres Lebens umweltfreundlicher zu gestalten, gewinnt auch ein ökologischer Bausektor an Bedeutung. Als vielseitig verwendbares und in großen Mengen verfügbares Material ist Stroh ein großer Hoffnungsträger, der in Zukunft viele Gebäude grüner machen wird. Noch beschränkt sich der Einsatz auf Einfamilienhäuser, doch auch in großvolumigen Bauten werden Stroh oder daraus gewonnen Produkte ihren Platz finden.

Quellenverzeichnis

Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 3.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2008.

Gruber, Herbert/Gruber, Astrid/Santler, Helmuth: Neues Bauen mit Stroh in Europa. 4.Auflage. Staufen bei Freiburg: Ökobuch 2012.

Minke, Gernot/Mahlke Friedemann: Building with Straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture. 1. Auflage. Basel: Birkhäuser 2005.

Nicolai, Andreas/Fechner, Heiko: PostProc 2 Handbuch. In:
https://www.bauklimatik-dresden.de/postproc/help/de/index.html#_vt_t_schimmelmodell (letzter Zugriff: 27. 06. 2020)

Pech, Anton: BK010 Bauphysik 20120831 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19.

Pech, Anton: BK020 Tragwerke 20180907 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2019/20.

Pech, Anton: BK040 Waende 20071029 FH. Wien: FH Campus Wien. Skriptum. WS 2018/19.

Wimmer, Robert/Hohensinner, Hannes/Eikemeier, Sören: Stroh-Cert. Zertifizierung, Logistik und Qualitätsmanagement für den Strohballenbau. 1. Auflage. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2011.

WTA-Merkblatt 6.3.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos.
2006. Hrsg.: Fraunhofer IRP Verlag.

Wuhan, Jakub: Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of
straw. London: University of East London School of Computing and Technology
2007.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vorgespannte Wand mit Ringanker	4
Abb. 2: Vorgespannte Wand mit Spannseilen.....	5
Abb. 3: Wandaufbau S-House	7
Abb. 4: Wandaufbau Naturhaus Wechselland.....	8
Abb. 5: Kapillare Kondensation	12
Abb. 6: Zersetzung von Stroh in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte	15
Abb. 7: Isoplethenmodell	18
Abb. 8: Alternativer Wandaufbau Naturhaus Wechselland	28
Abb. 9: Relative Luftfeuchtigkeit in einer lasttragenden Strohballenwand	31
Abb. 10: Isoplethenmodell in 3cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand	32
Abb. 11: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand	33
Abb. 12: VTT-Schimmelmodell in 3cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer lasttragenden Strohballenwand.....	34
Abb. 13: Relative Luftfeuchtigkeit in einer verbesserten lasttragenden Strohballenwand	37
Abb. 14: Relative Luftfeuchtigkeit über ein Jahr in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	38
Abb. 15: Isoplethenmodell in 1 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	39
Abb. 16: Isoplethenmodell in 3 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	39
Abb. 17: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	40
Abb. 18: VTT-Schimmelmodell in 1 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	41
Abb. 19: VTT-Schimmelmodell in 3 cm Tiefe der Strohschicht von außen in einer Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	41
Abb. 20: Relative Luftfeuchtigkeit über ein Jahr in einer verbesserten Vollholzwand mit außenliegender Strohdämmebene.....	44
Abb. 21: Y-Schnitt in 80 cm Höhe durch Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	45
Abb. 22: Zeit-Schnitt durch Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland am Tag 400	45
Abb. 23: Isoplethenmodell in 1 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	46
Abb. 24: Isoplethenmodell in 3 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	47
Abb. 25: Isoplethenmodell in 6 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	47
Abb. 26: : VTT- Schimmelmodell in 1 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	48
Abb. 27: VTT- Schimmelmodell in 3 cm Tiefe von ausgefüllte Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	49
Abb. 28: Y-Schnitt in 80 cm Höhe durch verbesserten Wandaufbau einer ausgefüllten Holzrahmenkonstruktion von Naturhaus Wechselland	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Schimmelindex	20
-----------------------------	----

Anhang