
A Einführung

1 Hintergrund

Da Klimaschutz und Energieeffizienz unter anderem zu den Schwerpunkten nationaler und internationaler Politik gehören und in die einzelnen Bereiche unseres täglichen Lebens umgesetzt werden, ist die Einsparung von Energie und die damit verbundene effektive Wärmedämmung ein entscheidender Beitrag. Üblicherweise werden auf Erdöl basierende Kunststoffschäume und Mineralfasern als Dämmstoffe eingesetzt (Gellert 2010). Einen marginalen Marktanteil der Dämmstoffe beanspruchen derzeit Naturmaterialien wie Hanf, Flachs, Stroh oder Wolle (Anonymus 2014a). Im Jahr 2011 wurden weltweit rund 28,4 Mio. m³ Dämmstoffe verkauft, dabei haben Dämmstoffe aus mineralischen Rohstoffen (Glas- und Mineralwolle) mit 47,6 % den größten Marktanteil, den zweitgrößten Anteil mit 45,6 % haben Kunststoffschäume (Anonymus 2014b). Des Weiteren lag der Marktanteil von nachwachsenden Dämmstoffrohstoffen bei 7,2 %, wobei die Zellulose- und Holzfaserdämmstoffe davon den Hauptteil einnahmen. Dabei kommt es immer stärker auf die Nachhaltigkeit und den Lebenszyklus der verwendeten Materialien an.

Natürliche, nicht ölbasierende Dämmstoffe zeichnen sich durch ihre Nachhaltigkeit sowie ihre bauphysikalischen Eigenschaften aus. Dies spiegelt sich in der Wohnraumqualität wider und sorgt für ein angenehmes Wohlbefinden. Die Nachfrage nach Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen nimmt stetig zu, da seit einigen Jahren vermehrt architektonisch ansprechende Strohballenhäuser gebaut werden (vgl. Knapp 2016, Scharmer 2013 und Schmidt 2016). Durch solche Gebäude wurde das Interesse an mit Stroh gedämmten Gebäuden geweckt, ein häufig genannter Nachteil, wonach Mäuse und Nagetiere sich in den Wänden mit Strohdämmung einnisten, entkräftet und erkannt, dass es technisch möglich ist, Passivhäuser mit natürlichen und extrem kostengünstigen Materialien zu konstruieren (Gruber und Santler 2008). Stroh ist ein regionales Material und wird meist nur für die Tiermast verwendet. Derzeit wird das vorhandene Potenzial einer Kaskadennutzung für diesen Rohstoff nur selten angewandt, meist wird er ohne weitere Nutzung der CO₂-neutralen energetischen Verwertung zugeführt oder durch eine Kompostierung am Feld organisch abgebaut (Abbildung 1).

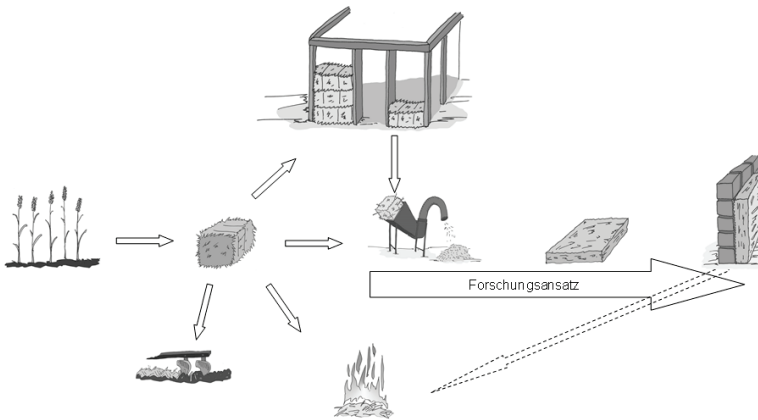


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer möglichen Kaskadennutzung von ein- bzw. mehrjährigen Pflanzenkulturen (Huber et al. 2015)

Dabei liefert das Material im Strohballenhausbau erstaunlich gute Wärmeleitfähigkeiten (λ -Wert) von rund 0,067 W/mK (Ashour et al. 2011). Jedoch besteht ein Unterschied in der Einbaurichtung des Strohballens (Gruber und Santler 2008): Im stehenden Einsatz des Ballens liegt der Wärmeleitfähigkeitswert (λ -Wert) bei 0,045 W/mK, wogegen im liegenden Einbau der λ -Wert bei 0,06 W/mK liegt (Dobrovits 2007). Denn neben diesen Wärmeleitfähigkeitswerten sind bei der Weiterverarbeitung dieses Rohstoffes zu einem Werk- bzw. Baustoff bestimmte interne Eigenschaften zu berücksichtigen (Nagl 2014, Nagl et al. 2015a, b). Zum einen besitzen Stroh bzw. Strohballen anisotropische Materialeigenschaften (Ashour et al. 2011) und zum anderen sind bereits im Planungsstadium von Objekten höhere Wandstärken zu beachten. Diese Erfordernisse können bei Neubauten berücksichtigt werden, jedoch können sich bei Sanierungs- und Renovierungsarbeiten an bestehenden Gebäuden aufgrund erhöhter Wandstärken erhebliche Nachteile im Vergleich zu anderen Bau- bzw. Dämmstoffen ergeben (Schnabel et al. 2016). Abhilfe könnten homogenisierte Dämmstoffplatten auf Strohbasis mit standardisierten Materialeigenschaften für den Sanierungsbereich schaffen (Huber et al. 2015). Das Fehlen eines entsprechenden Baustoffes kann unter anderem auf das noch nicht ausreichend gelöste Problem der schlechten Verklebungseigenschaften einiger Strohsorten (z. B. Weizenstroh) aufgrund der vorliegenden Wachsschicht zurückgeführt werden (Paulitsch und Barbu 2015), wobei Standard-Klebesysteme aus dem Holzbereich hierbei geringe Festigkeiten erreichen (Boquillon et al. 2004, Zhang et al. 2003).



An dieser Stelle setzen die erwähnten Studien in diesem Buch an, die Entwicklung von stroh-basierenden Dämmmaterialien und deren Verwendung können das enthaltene CO₂ länger speichern und so einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Herstellung von Dämmplatten mit geringer Rohdichte und niedrigen Wärmeleitfähigkeitswerten, jedoch mit ausreichender Festigkeit für den späteren, möglichen Einsatzbereich und die Bestimmung von weiteren wichtigen Dämmstoffeigenschaften. Ein zweiter Schwerpunkt wurde auf die Untersuchung zur Eignung von Strohmaterialien als Schütt- bzw. Einblasdämmung gesetzt. Hierbei spielen andere Materialkenngrößen wie z.B. Schüttrohichte eine wichtige Rolle.

B Charakterisierung möglicher Pflanzen

Der Getreideanbau hat eine lange Tradition und dabei wurde nicht nur das Getreidekorn, sondern auch das anfallende Stroh zu unterschiedlichen Zwecken genutzt. Früher wurde das Stroh nach der Getreideernte mit der Hand geschnitten und aufwändig für die Trocknung zusammengebunden. Heute erfolgt die Ernte maschinell und durch die Entwicklung der Landmaschinentechnik kann diese immer schneller und effizienter eingefahren werden (Scharf 2015). Die Verarbeitungsmöglichkeiten von Stroh sind neben der landwirtschaftlichen Nutzung weit gefächert, so finden sich viele Einsatzgebiete von der stofflichen Nutzung als Baumaterial bis hin zur energetischen Nutzung (Levandowski 2016).

Die Mehrzahl der hier verwendeten Pflanzen wird als Ein- bzw. Mehrjahrespflanzen bezeichnet. Jährlich werden ca. 240 Mio. t Getreidestroh als Nebenprodukt in der europäischen Landwirtschaft produziert (Clariant 2013) und weltweit ist dies bei ca. 10fache eingeschätzt (Paulitsch und Barbu 2015), welches somit das größte Potenzial erneuerbarer Energien auf der Erde darstellt. Da diese Erzeugnisse ein komplexes Zusammenspiel verschiedener chemischer Verbindungen darstellen, besteht ein großes ökonomisches wie ökologisches Interesse an einer Verwertung dieses Materials. Dieses wird für unterschiedliche Anwendungsgebiete eingesetzt. Hauptsächlich wird Getreidestroh in der Landwirtschaft als Raufutter, Einstreu in der Tierproduktion, zur Humusproduktion bzw. Bodenauflockerung im Ackerbau sowie als Brennstoff oder Ausgangsmaterial zur Bioethanolgewinnung verwendet (Berger et al. 2004). Bei der Verwendung von Stroh als Brennmaterial wird es zu Ballen, Häcksel, Pellets oder Briketts verarbeitet (Vetter 2008). Im Sinne einer nachhaltigen Produktion von Biomasse für die Gewinnung von Energie werden auch andere Pflanzen angebaut (Levandowski 2016). Eine davon ist der Miscanthus (mehrjährige Pflanze), der nicht für die Lebensmittelproduktion oder Tiernahrung verwendet wird, sondern zur Bereitstellung und Weiterverwendung von Biomasse, sei es nun zur Energiegewinnung oder für die Landschaftspflege (z. B. Mulchmaterial) (Krenn 2017).

1 Aufbau der Pflanzen

Pflanzenmaterialien haben einen hierarchischen Aufbau und die verwendeten Materialien und Strukturen sind im Laufe der Zeit von der Natur optimiert worden.

1.1 Struktureller Aufbau

Der Halm der Süßgräser (Spross) besteht im Wesentlichen aus Nodien (Knoten) und röhrenförmigen Internodien, wobei diese im Inneren hohl sind. Die Halmstärke nimmt von



unten nach oben ab, hingegen nimmt die Internodienlänge von unten nach oben zu und die Wandstärken variieren sowohl zwischen als auch innerhalb der Internodien (Schwarz 2010). Von besonderer Bedeutung für die Stabilität von Süßgräsern ist der Abstand zwischen den Nodien und den Internodien, diese kann durch den Anbau kurzstrohiger Getreidesorten erheblich verbessert werden (Aichele et al. 2011).

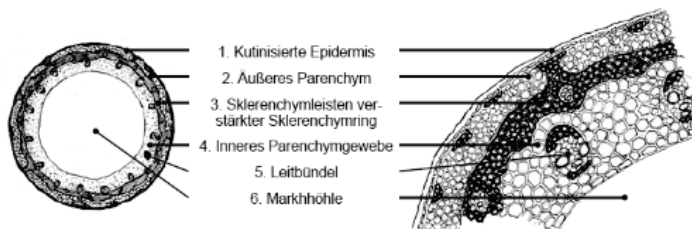


Abbildung 2: Querschnitt durch einen Roggenhalm (Krick 2008)

In Abbildung 2 ist schematisch ein Querschnitt eines Getreidehalms dargestellt. Dabei können einzelne Schichten von außen nach innen unterschieden werden.

Die Epidermis ist eine einzellige Schutzschicht, die den gesamten Pflanzenkörper umgibt. Die Schutzschicht (Wachsschicht) besteht hauptsächlich aus Kutin, das ist eine polyesterartige Substanz auf der Oberfläche, die bei speziellen Pflanzenzellen zu finden ist (Krick 2008). Sie schützt die Pflanze vor Wasserverlust, UV-Strahlung, mechanischen Beschädigungen, dem Eindringen von Wasser, Pilzen und Bakterien, zudem verbessert diese Schicht die Standsicherheit der Pflanze (Jäger et al. 2003).

Das Parenchymgewebe ist ein sehr weicher Bestandteil der Pflanzen, der die Räume zwischen den unterschiedlichen Gewebearten ausfüllt (Krick 2008). Dieses Gewebe ist reich an Chloroplasten und dient zum Speichern von Fett, Eiweiß, Kohlenhydraten und als weitere Funktion zum Speichern von Wasser (Jäger et al. 2003).

Der Sklerenchymring mit Sklerenchymleisten setzt sich teilweise aus verholzten und abgestorbenen Zellen zusammen, die mit dicken, ligninhaltigen, sekundären Zellwänden verstärkt sind (Jäger et al. 2003, Krick 2008) und bildet somit das Traggerüst der Getreidepflanze. Anhand des Querschnittes in Abbildung 2 ist eine zahnradförmige Anordnung der Sklerenchymleisten erkennbar, wodurch eine statische Verstärkung des Ringes erfolgt. Die Sklerenchymfasern werden in zwei Arten eingeteilt, zum einen in unverholzte, elastische Fasern, die etwaige Zugbeanspruchungen aufnehmen und zum

anderen in lignifizierte Hartfasern, die die Druckbelastungen der Pflanze aufnehmen (Krick 2008, Kadereit et al. 2014).

Des Weiteren befinden sich im inneren Parenchymgewebe die eingebetteten Leitbündel, die zum größten Teil aus größeren, farblosen Zellen bestehen (Jäger et al. 2003). Diese werden auch als Leitsystem bezeichnet und setzen sich hauptsächlich aus Xylem und Phloem zusammen. Die Funktion dieser Leitbündel ist der Transport von Wasser, organischen Substanzen und Nährstoffen von der Wurzel bis zum Fruchtkörper (Kadereit et al. 2014).

Die Markröhre ist der innere, durch die Nodien unterteilte, gewebefreie Raum des Strohhalms (Spross), der sich in der Mitte des Halms befindet (Krick 2008).

1.2 Chemische Bestandteile

Die Epidermis, die äußerste Schicht der ein- bzw. mehrjährigen Pflanzen, ist mit einer hydrophoben Wachsschicht, der Cuticula, ummantelt, was sie einerseits vor übermäßigem Wasserverlust, andererseits vor äußeren Einflüssen wie Bakterien oder Insekten schützt (Kozłowski et al. 2012). Bei Bäumen übernimmt diesen Schutz die Rinde, die aufgrund der Dicke, Festigkeit und unterschiedlichen Inhaltsstoffen einen umfangreicheren Schutz als die Wachsschicht bieten kann. Die Wachsschicht ist aber auch ein Faktor, der die Verklebung der Pflanzen hemmt, da sie die Benetzbarkeit aufgrund fehlender Oberflächenradikale senkt (Zhang et al. 2003). Dadurch erhöht sich der Bindemittelbedarf bei der Verarbeitung. Zugleich werden die Verklebungseigenschaften negativ beeinflusst (Paulitsch und Barbu 2015; Stelte et al. 2011; Deppe und Ernst 1996).

Die Fette und Öle, die ebenfalls Bestandteil der Pflanzen sind, zählen zur Gruppe der Lipide und bestehen aus Estern des Glycerins. Die Wachse, die auch als Lipide bezeichnet werden, sind aliphatische Polyester und beginnen bei 40 °C zu schmelzen, ohne sich dabei zu zersetzen (Faix 2008). Fette, Öle und Wachse verringern die Benetzbarkeit bei der Verwendung von säurehärtenden Bindemitteln und können so zur Verschlechterung der Verleimqualität führen, so der Autor weiter. In Tabelle 1 werden die unterschiedlichen Bestandteile ausgewählter ein- und mehrjähriger Pflanzen aufgelistet.

Hier ist erkennbar, dass vor allem der Ligninanteil bei den Strohsorten stark schwankt. Während Hanffasern oder -halm mit 2,0 – 5,0 % einen recht niedrigen Ligningehalt aufweist, liegen Mais und Miscanthus mit 19,0 % und Weizenstroh mit 8-15 % deutlich darüber. Auch der Hemicellulosegehalt ist bei Hanf mit 10,0 – 20,0 % am geringsten. Bei Mais, Miscanthus und Weizen liegt er im Bereich von 20-30 %. Hanfstroh kann mit 62-72 % den höchsten



Gehalt an Zellulose aufweisen. Der Zellulosegehalt der anderen Strohsorten liegt bei 35-45 % (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bestandteile ausgewählter ein- und mehrjähriger Pflanzen (nach Levandowski 2016, Kozłowski et al. 2012, Marutsky und Seeger 1999, Lawther et al. 1995, Kaparaju et al. 2009, Saha et al. 2005)

	Zellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Wachse (%)	Asche (%)
Hanfstroh	62,0-72,0	10,0-20,0	2,0-5,0	1,0-2,0	4,8-5,1
Maisstroh	38,0	26,0	19,0	-	6,0
Miscanthus	43,0	24,0	19,0	-	2,0-3,6
Weizenstroh	35,0-45,0	20,0-30,0	8,0-15,0	0,47-1,5	4,1-7,93

Auch beim Aschegehalt gibt es große Unterschiede. Den niedrigsten Gehalt an Asche weist Miscanthus mit lediglich 2-3,6 % auf, die anderen Stroharten liegen im Bereich von 4-8 % (Tabelle 1).

2 Süßgräser

Die verwendeten Stroharten, die in diesem Buch untersucht wurden, zählen zur Familie der Süßgräser (*Poaceae*). Dieser Familie gehören 670 Gattungen und rund 10.000 Arten an, sie kann damit heute zu den größten Pflanzenfamilien gezählt werden (Düll und Kutzelnigg 2011).

2.1 Weizen

Der botanische Name des Weizens ist *Triticum aestivum* und er gehört zur Familie der Süßgräser. Weizen ist eine einjährige Getreidepflanze mit Ursprung in Zentralasien, welche im Laufe der Jahrhunderte in vielen Teilen der Welt in unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen Verbreitung gefunden hat. Heutzutage ist er neben Mais und Reis eine der bedeutendsten Kulturpflanzen der Welt. Bei optimalen Wachstumsbedingungen können Stroherträge von 5 bis 8 t/ha erzielt werden (Pude et al. 2012). Die gesamte jährliche Menge von Getreidestroh wird auf rund 30 Mio. t TM (Trockenmasse) in Europa geschätzt (Bauer 2016), wobei hier keine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Getreidearten angegeben wurde.

2.2 Mais

Ursprünglich kam der Mais (*Zea mays*) Entdeckung Amerikas über den Seeweg nach Europa. Durch spezielle Züchtungen von frühreifen Hybrid-Maissorten kann diese, zu den

Hackfrüchten gehörende Pflanzenart, auch in klimatisch ungünstigen Gebieten angebaut werden (Wolf 2015). Es können Gesamttrockenmasseerträge von 15 – 20 t/ha erzielt werden (Pude et al. 2012). Die gesamte jährliche Menge von Maisstroh wird auf rund 12 Mio. t TM in Europa geschätzt (Bauer 2016). Maisstängel ist das Nebenprodukt der Körnermaisernte und wird meist gemulcht und dann mit dem Pflug eingearbeitet. Durch diesen Arbeitsschritt wird das Winterdomizil des Maiswurzelbohrers zerstört und es soll die Ausbreitung des Schädlings unterbunden werden.

Das Mulchen des Maisstrohs wird mit einem Rotormulcher durchgeführt, der mit unterschiedlichen Messern ausgestattet ist. Dadurch ist das Unterpflügen oder der Abtransport des Maisstrohs zur Biogasanlage einfacher zu handhaben, dazu wird das Stroh zu Schwaden bzw. Zeilen mittels Einzel- oder Doppelschwader geformt und folglich mit einem Ladewagen aufgenommen. In der Biogasanlage wird das Maisstroh in den Silo eingefahren, verdichtet und luftdicht verpackt. Nach der Vergärung wird die Silage dort zu Methan verarbeitet.

2.3 Miscanthus

Das Chinaschilf, wie *Miscanthus* (*M. sinensis*) genannt wird, kommt ursprünglich aus dem asiatischen Raum. Seit den 1990ern wird es auch in Mitteleuropa angebaut. Bei der Fruchtfolge handelt es sich um einen mehrjährigen Feldanbau, deshalb ist der *Miscanthus* als Dauerkultur ausgelegt und es kann mit einer etwa 30-jährigen Ertragszeit gerechnet werden (Levandowski 2016). Die jährlichen Erträge können von 15 – 22 t TM (Trockenmasse) / ha reichen (Pude et al. 2012).

Bei *Miscanthus sinensis* handelt es sich um eine sogenannte „Low-Input-Pflanze“, da sie auch in unseren Breiten keine großen Ansprüche hinsichtlich des Klimas und der Bodenbeschaffenheit hat (Wolf 2015).

Die Ernte kann mit einem reihenunabhängigen Maisvorsatz eines Feldhäckslers erfolgen. Die eingestellte Häckellänge liegt meist im Bereich zwischen 10 und 24 mm. Ein alternatives Ernteverfahren ist das Häckseln mit dem Feldhäcksler mit nur zwei Messern und offenem Trommelboden. Die abgelegte Schwad wird anschließend mit einer Großpackenpresse gepresst. Ziel dieses Verfahrens ist das Erreichen einer deutlich höheren Transport- und Lagerdichte im Vergleich zur ersten Variante. Durch die Schwadablage am Boden nimmt die Großpackenpresse neben dem Häckselgut auch abgefallene Blätter auf, was zu einem erhöhten Feuchtegehalt und damit zu Schimmelbildung in den Ballen führen kann. Bei einem



in Deutschland erprobten Ernteverfahren befördert der Fel dhäcksler das Häckselgut in einen über der Pick-up einer Großpackenpresse montierten Trichter. Die neben dem Häcksler herfahrende Presse produziert Quaderballen. Der Vorteil gegenüber dem vorher beschriebenen Verfahren ist, dass am Boden liegende Blätter nicht aufgenommen werden.

C Hintergrund - Materialeigenschaften

In diesem Kapitel werden wichtige Hintergrundinformationen zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Arbeiten gegeben.

1 Wärmedämmstoffe

Unter Wärmedämmung versteht man alle Maßnahmen, die den Wärmeverlust von Gebäuden an die Umgebung verringern.

1.1 Gründe für das Wärmedämmen

Die Wärmedämmung soll den Wärmedurchgang durch die Außenhülle (Dach und Außenwand) des Gebäudes verringern. Die Wärmedämmung beruht auf dem Prinzip des Einschlusses von Luft oder anderen Gasen in Hohlräume des Materials. Da Gase schlechte Wärmeleiter sind, wird damit die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung verringert, hingegen die Wärmedämmung erhöht. Daher spielen eine energiebewusste Bauweise und hochwertige Dämmstoffe eine wesentliche Rolle. Nach Schätzungen werden in Deutschland pro Jahr etwa 22 Mio. m² Dämmstoffe verbaut Gellert (2010).

Dämmstoffe werden je nach Einbauart in Schütt- u. Einblasdämmstoffe, Matten oder plattenförmige Dämmstoffe unterschieden. Des Weiteren werden verschiedene Eigenschaften wie Belastbarkeit, Brandverhalten, Wärmeleitfähigkeit für unterschiedlichste Anwendungen optimiert (Weiß und Paproth, 2001).

1.1.1 Bauphysikalische Eigenschaften

Die Hauptthemen der Bauphysik lassen sich derzeit in vier Bereiche unterteilen (Riccabona und Bednar 2010) und sind nachfolgend dargestellt:

- Gesamtenergieeffizienz und thermisches Gebäudeverhalten
- Schallschutz und Raumakustik
- Dauerhaftigkeit und Risikomanagement
- Brandschutz

Demnach fällt der Bereich der Dämmstoffe in die Bauphysik. Da sich aber diese Arbeit nur mit der Ermittlung der wärmeleitenden Eigenschaften sowie weiteren physikalischen Eigenschaften und Größen befasst, werden nachfolgend wichtige bauphysikalische Begriffe und Definitionen dargestellt, die zum besseren Verständnis für diese Arbeit führen sollen.