

## Verfahrenstechnische Möglichkeiten sowie ökonomische und energetische Bewertung der Herstellung von Wärmedämmstoffen aus pflanzlichen Rohstoffen: Beispiel Flachs und Rohrkolben

### *Possibilities of Process Engineering, Economic and Energetic Rating of Producing Heat Insulators from Plant Raw Materials: Example - Flax and Cattail*

Gerhard Englert, Verena Batschkus, Anne Ringleb und Hans Schön  
Institut für Landtechnik, TU München, Freising-Weihenstephan

**Kurzfassung:** Nach einem Rechenmodell für den Wärmetransport in Faser-Wärmedämmstoffen sollte die Wärmeleitfähigkeit auch bei Flachsfasern und Rohrkolben-Partikeln über den Faser- bzw. Partikeldurchmesser und die Rohdichte bzw. Schüttdichte zu beeinflussen sein. Damit würden sich verschiedene Alternativen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen ergeben, wenn diese Eigenschaftsgrößen durch unterschiedliche verfahrenstechnische Behandlung der Rohstoffe verändert werden. Die Auswahl der für die Vermarktung geeignetesten Alternative erfolgt über eine ökonomische und eine energetische Bewertung.

Meßergebnisse bestätigen die Gültigkeit des Wärmetransportmodells bei Flachsfasern und Rohrkolben-Partikeln. Aus Flachsfasern hergestellte Wärmedämmplatten weisen Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,035 - 0,045 W/(mK) auf. Die Herstellungskosten liegen bei 70 bis 100 DM/m<sup>3</sup>. Ein aus Rohrkolben hergestelltes Schüttgut hat ebenfalls Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 0,035 - 0,045 W/(mK), wobei die Schüttdichte maßgeblicher Einflußfaktor ist. Die Herstellungskosten für das Schüttgut liegen zwischen 40 DM/m<sup>3</sup> für einen Wert der Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/(mK) und 80 DM/m<sup>3</sup> für 0,035 W/(mK), mit stark steigender Tendenz bei weiterer Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit.

Der Primärenergieaufwand für die Herstellung einer Wärmedämmschicht beträgt bei Flachsfasern etwa 265 MJ/m<sup>3</sup>, beim Rohrkolben etwa 215 MJ/m<sup>3</sup> und liegt damit deutlich unter dem Vergleichswert von 1800 - 2500 MJ/m<sup>3</sup> für Mineralfaser-Wärmedämmstoffe.

**Deskriptoren:** Flachs, Rohrkolben, pflanzliche Wärmedämmstoffe, Wärmeleitfähigkeit, Herstellungskosten, Primärenergieverbrauch

*Abstract:* According to a calculation model for heat transport in fibre heat insulators, it should be possible to influence the thermal conductivity of flax fibres and cattail particles by the fibre / particle diameter and bulk density too. Varying these quantities by processing the raw materials in different ways would result in different possibilities for producing heat insulators. An economic and energetic rating is conducted to select the alternative best suited for the market.

*Measuring results confirm the validity of the heat transport model for flax fibres and cattail particles. Flax fibre thermal blankets have thermal conductivities in the range of 0.035 - 0.045 W/(mK). The production costs are between 70 and 100 DM/m<sup>3</sup>. The thermal conductivities of a cattail bulk heat insulator vary from 0.035 to 0.045 W/(mK), with bulk density as the main influencing factor. The production costs are between 40 DM/m<sup>3</sup> for a thermal conductivity of 0.045 and 80 DM/m<sup>3</sup> for 0.035, with strongly increasing values for further decreasing thermal conductivity.*

*The primary energy input for producing a heat insulating layer represents about 265 MJ/m<sup>3</sup> for flax fibre material and about 215 MJ/m<sup>3</sup> for cattail bulk material and is thus significantly lower than the comparative value of 1800 - 2500 MJ/m<sup>3</sup> for mineral fibre heat insulators.*

**Keywords:** Flax, cattail, plant heat insulators, thermal conductivity, production costs, primary energy input

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die Verringerung des Energieverbrauches und der Emission von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) stellen zwei der vorrangigen Umweltschutzziele in Deutschland dar. 30 % des Gesamtenergieverbrauches entfallen auf die Heizung von Privatgebäuden. Dementsprechend stammt auch ein beträchtlicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus diesem Sektor. Durch den Einsatz von Wärmedämmstoffen lassen sich Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich verringern.

Das Marktvolumen für Wärmedämmstoffe betrug 1994 knapp 30 Mio. m<sup>3</sup>. Es zeichnet sich durch kontinuierliches Wachstum mit Zuwachsraten von bis zu 8 % pro Jahr aus, Folge einer Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden. 95 % des Marktes werden von künstlichen Mineralfaser- und Schaumkunststoff-Produkten abgedeckt [1]. Da die Mineralfaser-Produkte in den Verdacht gerieten, Lungenkrebs zu erzeugen, und die Schaumkunststoffe wegen ihrer energie- und rohstoffintensiven Herstellung sowie wegen ihrer Ausscheidung von klimarelevanten Treibgasen (FCKW) kritisiert wurden, nahm das Interesse an „alternativen“ Wärmedämmstoffen aus biogenen Rohstoffen stetig zu. Für diese Rohstoffe spricht nicht nur, daß der Einsatz nachwachsender Rohstoffe nicht erneuerbare Ressourcen schont und neue Märkte für die Landwirtschaft erschließt, sondern auch, daß sich die Entsorgung relativ problemlos gestaltet (Kompostierung, geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf beim Verbrennen).

Um Marktchancen zu haben, müssen auch die biogenen Wärmedämmstoffe die bautechnischen Anforderungen an Wärmedämmstoffe (s. **Tabelle 1**) erfüllen und im Preis herkömmlichen Materialien vergleichbar sein.

Ob und unter welchen Bedingungen sich pflanzliche Faserrohstoffe für die Herstellung von marktfähigen Wärmedämmstoffen eignen, wird am Beispiel von Flachs und Rohrkolben überprüft, wobei sich die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit auf die technische Schlüsselgröße von Wärmedämmstoffen, die Wärmeleitfähigkeit, konzentrieren. Dazu wird zunächst aufgezeigt, über welche Eigenschaftsgrößen bzw. mit welchen zugeordneten technischen Verfahren die Wärmeleitfähigkeit zu beeinflussen ist, welche Ernte- und Aufbereitungsverfahren für die Rohstoffe zur Verfügung stehen und welche ökonomischen und energetischen Werte marktüblicher Wärmedämmstoffe als Vergleichsmaßstab heranzuziehen sind. Nach einer kurzen Übersicht über die Probenherstellung und die Meßverfahren sowie die

Ermittlung der ökonomischen und energetischen Daten erfolgt eine Zusammenstellung der Meßergebnisse sowie die ökonomische Bewertung der verschiedenen Herstellungsverfahren, um eine Auswahl unter den sich anbietenden Verfahrensvarianten treffen zu können. Eine energetische Bewertung der Herstellung einer Wärmedämmschicht schließt sich an.

Tabelle 1: Anforderungen an Wärmedämmstoffe  
Table 1: Demands made of heat insulators

Eigenschaft	Zielvorgabe	Prüfnorm
Wärmeleitfähigkeit	< 0,045 W/mK	DIN 52 612
Brandverhalten	B <sub>2</sub> , normal entflammbar	DIN 4102
Feuchteverhalten	Feuchtegehalt < 20 %	DIN 52 620
Setzungsverhalten	< 20 %	baurechtliche Zulassungen
Verhalten gegenüber Schimmel	beständig	DIN 40 046
Verhalten gegenüber Schädlingen	beständig	DIN IEC 68 T 2-10

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Verfahrenstechnische Möglichkeiten bei der Herstellung von Faser-Wärmedämmstoffen

Wärmedämmstoffe unterscheiden sich von anderen Baustoffen dadurch, daß ein Großteil ihres Volumens von einem schlecht wärmeleitenden Gas, meist Luft, ausgefüllt wird. Dieses ist in den Poren des Feststoffes eingeschlossen. Außerdem kann es sich bei Wärmedämmstoffen aus Fasern oder bei körnigen Schüttungen in den Zwischenräumen befinden.

Ein von LARKIN und CHURCHILL [2] für Faser-Wärmedämmstoffe entwickeltes Wärmetransportmodell zeigt, daß sich die Wärmeleitfähigkeit über die spezifische innere Oberfläche, d.h. aber über die Faserabmessungen, speziell den Faserdurchmesser, und die Rohdichte, verändern läßt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit abnehmendem Faserdurchmesser und zunehmender Rohdichte bis zu Minimalwerten ab. Für z.B. Glasfasern errechnet sich ein Minimalwert bei etwa 5 µm Faserdurchmesser (bei 80 °C und einer Rohdichte von 8 kg/m<sup>3</sup>), für Polyesterfasern im Bereich zwischen 30 und 100 kg/m<sup>3</sup> [3].

Damit bietet es sich bei pflanzlichen Rohstoffen, die in sich Poren enthalten oder die zu Fasern bzw. Partikeln aufbereitet werden können, an, die innere Oberfläche von damit hergestellten Wärmedämmstoffen über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten Zerkleinerung bzw. Zerkleinerung sowie Verdichtung zu vergrößern und so die Wärmeleitfähigkeit zu verringern.

## 2.2 Ernte- und Aufbereitungsverfahren

### 2.2.1 Flachsfaser-Wärmedämmatten

Die Prozesse und technischen Anlagen, die bei der Herstellung von Flachsfaser-Wärmedämmatten zum Einsatz kommen, zeigt **Tabelle 2** (nach [3]).

Tabelle 2: Prozesse und technische Verfahren/Anlagen bei der Herstellung von Flachsfaser-Wärmedämmstoffen  
Table 2: Processes and technical equipment for producing flax fibre heat insulators

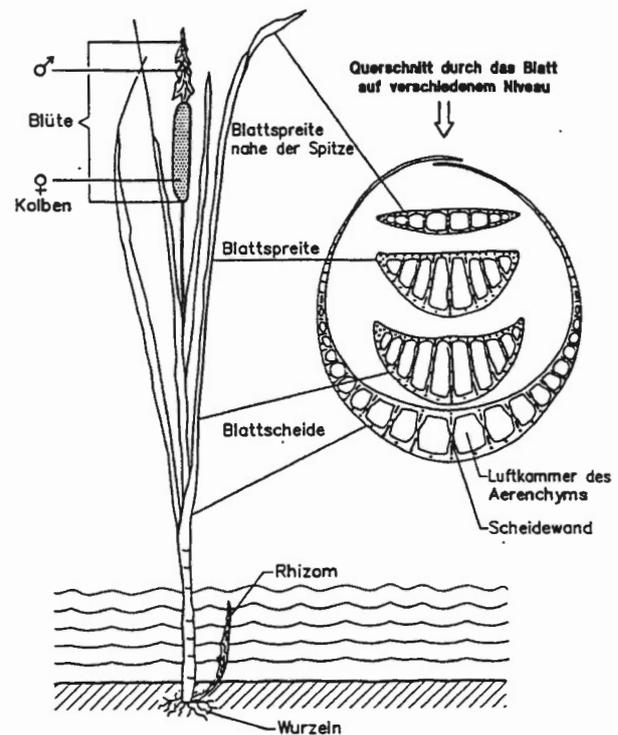
FLACHSSTENGEL	
Prozeß	Verfahren/Anlage
<b>FASERGEWINNUNG</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufweichung des Verbundes Faserbündel-Holz</li> <li>• Aufbrechen der Stengelstruktur</li> <li>• Absonderung der Holzteile (Schäben) und der Kurzfasern (Werg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Röste (mikrobieller Abbau des Pektins auf dem Acker)</li> <li>• Riffelwalzenanlage</li> <li>• Sägezahnwalzenanlage</li> </ul>
<b>VLIESBILDUNG</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflockerung der Faserwolle</li> <li>• Absonderung von Verunreinigungen</li> <li>• Zumischung der Bindefasern</li> <li>• Homogenisierung (Ausrichtung der Fasern)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Krempel</li> <li>• Aerodynamisches Verfahren</li> </ul>
<b>HERSTELLUNG VON MATTEN/PLATTEN</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausrichtung der Vliese</li> <li>• Vernadelung und/oder thermische Verklebung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschichtungs- und Verfestigungsanlage</li> </ul>
<b>FLACHSFASER-WÄRMEDÄMMSTOFF</b>	

Bei der Ernte kann der Flachs entweder gerauft, d. h. mit den Wurzeln aus dem Boden gezogen, und geschwadet oder gemäht werden. Die anschließende Röste, bei der ein mikrobieller Abbau des Faserbündel-Bindemittels Pektin auf dem Feld stattfindet, fördert den Aufschluß

der Faserbündel. Das Flachsstroh wird zu Großballen verpreßt. Bei der Aufbereitung kommt es darauf an, die Faserbündel des Ausgangsmaterials in dünnere Faserbündel oder Einzelfasern zu zerlegen und dabei eine möglichst hohe Ausbeute zu erreichen, ohne die Fasern zu stark zu verkürzen oder zu beschädigen. Die Entholzung und Zerkleinerung kann in einer Schwinde bzw. in einer Riffelwalzen- oder Sägezahnwalzen-Anlage erfolgen. Vor der Vliesbildung ist die Faserwolle aufzulockern und von Verunreinigungen zu säubern. Nach Beimischung von Schmelzfasern werden die Fasern in einer Krempel oder in einem pneumatischen Verfahren zu einem Faservlies verarbeitet. Durch Vernadelung oder thermische Verfestigung mehrerer Vliese entstehen schließlich als Endprodukte Matten oder Platten.

### 2.2.2 Rohrkolben-Schüttgut

Die Rohrkolbenpflanze und das für die Wärmedämmwirkung ausschlaggebende Aerenchym zeigt **Bild 1**. Da die Möglichkeiten einer Verwertung der Rohrkolben zur Zeit erst untersucht werden, stehen noch keine eingeführten Erntetechniken zur Verfügung. Verschiedene technische Möglichkeiten der Aufbereitung wurden in [4] erprobt.



Quelle: Meyer

Bild 1: Aufbau der Rohrkolbenpflanze  
Fig 1: Structure of cattail plant

### 2.3 Ökonomische und energetische Vergleichswerte marktüblicher Wärmedämmstoffe

Wärmedämmplatten aus den biogenen Rohstoffen Baumwolle, Flachs, Kokosfasern, Kork und Schafwolle werden, je nach Rohstoff und Ausführung, für 230-550 DM/m<sup>3</sup> angeboten. Die als Schüttgut eingesetzten Zelluloseflocken kosten 190 DM/m<sup>3</sup>. Der Preis künstlicher Mineralfaser-Wärmedämmstoffe liegt im Bereich um etwa 100 DM/m<sup>3</sup>, der von Kunststoff-Hartschäumen zwischen 100 DM/m<sup>3</sup> (Polystyrol-Partikelschaum) und 320 DM/m<sup>3</sup> (Polystyrol-Extruderschaum).

Der Energieaufwand zur Herstellung von Wärmedämmschichten aus Zelluloseflocken und Kokosfasern beträgt nach SÖRENSEN [5] unter 360 MJ/m<sup>3</sup>, bei künstlichen Mineralfasern und Hartschäumen zwischen 1800 und 2500 MJ/m<sup>3</sup> und bei Schaumglas über 2500 MJ/m<sup>3</sup>. Diese Werte eignen sich allerdings nur bedingt zum Vergleich, weil sie auf unterschiedlichen Berechnungsannahmen basieren.

Eine aufschlußreiche Größe zur ökologischen Bewertung stellt die primärenergetische Amortisationszeit dar. Dies ist die Zeitspanne, in der durch Einsatz des Wärmedämmstoffes mehr Heizenergie eingespart als bei seiner Herstellung verbraucht wird. Diese Amortisationszeit liegt bei Zellulose bei 2 - 3 Monaten, bei künstlichen Mineralfaserprodukten bei ca. 10 Monaten und bei Kunststoffhartschäumen bei ca. 13 Monaten [6].

## 3 Material und Meßverfahren

### 3.1 Probenherstellung

#### 3.1.1 Flachsfasermatten

Beim Flachs erfolgte die Probenherstellung mit vier gängigen Pflanzensorten (Ariane, Belinka, Mikael, Viking; [3]). Die bei der Herstellung der Wärmedämmplatten angewandten Prozesse und die eingesetzten technischen Anlagen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

#### 3.1.2 Rohrkolben-Schüttgut

Im Fall des Rohrkolbens stand Material aus einer Versuchspflanzung und einem Wildbestand zur Verfügung. Aus dem Rohmaterial wurde durch Zerkleinerung alternativ per Hand, mit einem Standhäcksler und mit Strohmaschinen ein Schüttgut hergestellt. Die für die Praxisanwendung notwendige Homogenisierung erfolgte durch Sieben auf einer Labor-Siebanlage und alternativ auf zwei industriellen Siebanlagen. Für die Verdichtung bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit sorgte eine Druckbelastung, die durch das Gewicht der oberen Me-

talplatte im Wärmestrom-Plattenmeßgerät aufgebracht wurde. Beim Einbau in ein Bauwerk soll das Schüttgut wie bei den Zelluloseflocken eingeblasen und dabei verdichtet werden.

### 3.2 Meßverfahren

#### 3.2.1 Abmessungen

Bei den Flachsfasern wurde die Faserlänge mit einem Lineal mit mm-Einteilung (geschätzte Meßunsicherheit:  $\pm 0,5$  mm) gemessen, der Faserdurchmesser mit einer Mikrometerschraube mit einer Skaleneinteilung von 10  $\mu\text{m}$  (Meßunsicherheit:  $\pm 5$   $\mu\text{m}$ ) [3].

Die Rohrkolbenpartikel sind ungleichmäßig geformt, so daß eine eindeutige Erfassung der geometrischen Abmessungen über die Größen Länge, Breite, Höhe nicht möglich ist. Es wurde deshalb eine Klassierung der Partikel mit Hilfe einer Siebanalyse vorgenommen [4].

#### 3.2.2 Rohdichte, Schüttdichte

Die Rohdichte wurde über das Gewicht und die Abmessungen der Wärmedämmplatten ermittelt.

Zur Messung der Schüttdichte diente ein Verfahren, das in den baurechtlichen Zulassungen für organische Schüttgüter vorgegeben ist [4]. Das trockene Schüttgut wird dabei in einen Behälter aus Lochblech mit dem Volumen von 0,1 m<sup>3</sup> eingebracht. Die Schüttdichte errechnet sich aus der gemessenen Masse und dem Volumen des Meßbehälters.

#### 3.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte in einem Plattenmeßgerät nach DIN 52 616 ("Wärmeschutztechnische Prüfungen - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplatten-Gerät") bei 3 verschiedenen Probenmitteltemperaturen und mit einer Meßunsicherheit von 7 % des Meßwertes [3, 4].

### 3.3 Ermittlung der ökonomischen und energetischen Daten

#### 3.3.1 Herstellungskosten

Zur Ermittlung der Herstellungskosten wurden die durch Befragung von Firmen ermittelten Investitionen und Betriebskosten auf den Produktionszeitraum eines Jahres und auf ein bestimmtes jährliches Produktionsvolumen bezogen [3, 4], so daß sich Gesamtkosten je Kubikmeter angeben lassen.

### 3.3.2 Primärenergieaufwand

Der Primärenergieaufwand zur Herstellung der Dämmstoffe ergibt sich aus den Werten für den Anbau der Rohstoffe und für die Aufbereitungsverfahren. Der Primärenergieaufwand für die Aufbereitung wurde ebenfalls durch Befragung von Firmen ermittelt [3, 4].

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Eigenschaftswerte

#### 4.1.1 Flachsfasermatten

##### Faserabmessungen, Faserertrag

Die Abmessungen der mit den beiden Walzenverfahren für die Flachssorte Viking gewonnenen Flachsfasern und der jeweils erzielte Ertrag sind in **Tabelle 3** zusammengestellt [3].

Tabelle 3: Abmessungen (Mittelwert und Standardabweichung, Probenzahl  $n = 100$ ) und Ertrag von Flachsfasern (Sorte Viking) bei Riffel- und Sägezahnwalzen-Aufbereitung (Röstdauer: 3,5 Wochen) sowie bei unterschiedlicher Röstdauer (Sägezahnwalzen-Produktionsanlage, 1 Durchlauf) [3]

Table 3: Dimensions (mean value and standard deviation, number of samples  $n = 100$ ) and yield of flax fibres (species Viking) for corrugated roll and sawtooth roll processing (retting period: 3.5 weeks) as well as for different retting periods (sawtooth roll production plant, 1 passage) [3]

Aufberei- tungs- verfahren	Faserdurch- messer  $\mu\text{m}$	Faserlänge  $\text{mm}$	Faserertrag  Masse-%
<b>RIFFELWALZENVERFAHREN</b>			
Grobauflöser	$40 \pm 19$	$69 \pm 42$	34
Grob- + Mit- telauflöser	$34 \pm 17$	$62 \pm 25$	30
Grob- + Mit- tel- + Fein- auflöser	$36 \pm 15$	$44 \pm 21$	25
<b>SÄGEZAHN WALZENVERFAHREN (Technikumsanlage)</b>			
1 Durchlauf	$31 \pm 14$	$48 \pm 21$	13
2 Durchläufe	$36 \pm 15$	$41 \pm 17$	-
<b>Röstdauer</b>			
1 Woche	$64 \pm 19$	$76 \pm 23$	16
2 Wochen	$63 \pm 16$	$76 \pm 24$	16
3 Wochen	$48 \pm 18$	$79 \pm 23$	21
4 Wochen	$39 \pm 16$	$79 \pm 24$	25
5 Wochen	$43 \pm 16$	$73 \pm 23$	23

Die Streuung der Meßwerte ist beachtlich. Es sind deshalb nur Tendenzaussagen möglich. Der Durchgang durch den Grob- und Mittelauflöser führt beim Riffelwalzenverfahren zum geringstmöglichen Faserdurchmesser. Beim Durchgang durch den Feinauflöser nimmt die mittlere Faserlänge deutlich ab, außerdem verringert sich der Faserertrag. Beim Sägezahnwalzenverfahren genügt ein Durchlauf.

Die Ergebnisse der Untersuchungen über den Einfluß der Röstdauer weisen nach, daß eine Röstdauer von 3 Wochen ausreicht. Ein längere Röste führt bei gleichem verfahrenstechnischen Aufwand für die Aufbereitung (ein Durchlauf durch die Sägezahnwalzenanlage) zu keinen deutlich verbesserten Werten für den Faserdurchmesser und Faserertrag.

#### Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen [3] sind in **Bild 2** und **3** dargestellt.

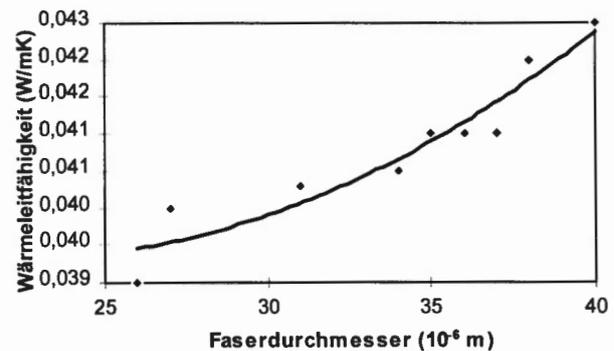


Bild 2: Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von Flachsfaser-Wärmedämmmatten mit dem Faserdurchmesser [3]  
Fig. 2: Variation of thermal conductivity of flax fibre thermal blankets with fibre diameter [3]

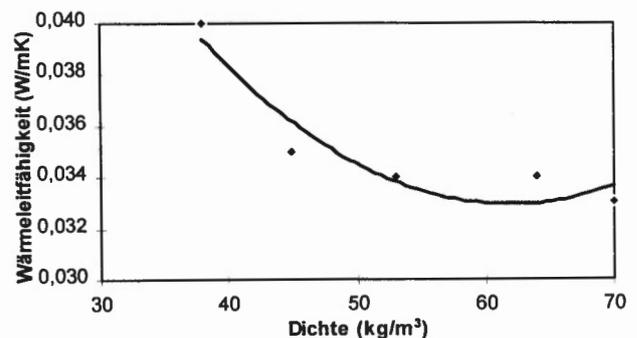


Bild 3: Veränderung der Wärmeleitfähigkeit von Flachsfaser-Wärmedämmmatten mit der Rohdichte [3].  
Fig 3: Variation of thermal conductivity of flax fibre thermal blankets with bulk density [3]

Es zeigt sich, daß sich auch bei Flachsfaser-Wärmedämmatten die Wärmeleitfähigkeit über den Faserdurchmesser und die Rohdichte beeinflussen läßt. Anzustreben sind nach Bild 2 Faserdurchmesser im Bereich unter  $35 \mu\text{m}$ . Diese Werte lassen sich, wie bereits gezeigt, beim Riffelwalzenverfahren mit dem Grob- und Mittelaflöser, beim Sägezahnwalzenverfahren in einem Durchlauf erreichen. Bei der Rohdichte führen Werte im Bereich  $40 - 70 \text{ kg/m}^3$  nach Bild 3 zu minimalen Werten der Wärmeleitfähigkeit. Da aber mit zunehmender Rohdichte der Materialverbrauch steigt, werden marktfähige Produkte eher Rohdichten unter  $40 \text{ kg/m}^3$  aufweisen.

#### 4.1.2 Rohrkolben-Schüttgut

Beim Rohrkolben wurde für unzerkleinertes und nicht verdichtetes Material eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,060 \text{ W/(mK)}$  gemessen (Bild 4, [4]).

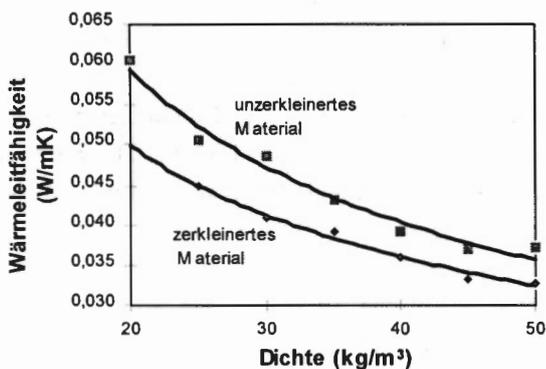


Bild 4: Veränderung der Wärmeleitfähigkeit einer Wärmedämmschicht aus zerkleinertem und unzerkleinertem Rohrkolben-Schüttgut mit der Schüttdichte [4]

Fig. 4: Variation of thermal conductivity of a heat insulation layer of chopped and unchopped cattail with bulk density [4]

Dieser Wert läßt sich durch Verdichten um  $0,020 \text{ W/(mK)}$  verringern. Die Zerkleinerung bringt eine weitere Abnahme der Wärmeleitfähigkeit um  $0,005 \text{ W/(mK)}$ , so daß die niedrigsten Meßwerte bei  $0,035 \text{ W/(mK)}$  liegen. Das Aussieben des Feinkornanteils bewirkt eine geringe Zunahme der Wärmeleitfähigkeit, allerdings innerhalb der Meßunsicherheit von  $0,003 \text{ W/(mK)}$ . Eine Zunahme wäre durch die Reduzierung der spezifischen inneren Oberfläche zu erklären. Diese Ergebnisse bestätigen, daß die grundlegenden Zusammenhänge des Wärmetransportmodells auch für das Rohrkolben-Schüttgut gültig sind.

Nach den Meßergebnissen ist eine Schüttdichte im Bereich um  $50 \text{ kg/m}^3$  anzustreben. Auch hier wird allerdings zu beachten sein, daß höhere Schüttdichten mit entsprechend höherem Materialbedarf verbunden sind. Eine Entscheidung über die zu wählende Schüttdichte erfordert eine ökonomische Bewertung.

## 4.2 Herstellungskosten

### 4.2.1 Flachsfasermatten

Nach den Ergebnissen von Modellrechnungen in Tabelle 4 [3] sind für den Faserrohstoff, die Aufbereitung, Vliesbildung und Verfestigung volumenbezogene Kosten zwischen  $73$  und  $101 \text{ DM/m}^3$  aufzuwenden. Die geringsten Gesamtkosten von etwa  $73 \text{ DM/m}^3$  ergeben sich für die Verfahrenskette Fasererzeugung mit Sägezahnwalzenanlage, Vliesherstellung mit der Krempel, thermische Verfestigung und Imprägnierung.

Tabelle 4: Kosten für die Herstellung von Wärmedämmatten aus Flachsfasern [3]

Table 4: Production costs of flax fibre thermal blankets [3]

Berechnungsannahmen: Berücksichtigt sind Jahreskosten für Personal, Maschinen (Investitionen + Reparaturen) und Energie, Zins:  $8,5\%$  p. a., Betrachtungszeitraum: 5 Jahre, jährliche Reparaturkosten:  $10\%$  des Investitionsbetrages, Strom:  $0,18 \text{ DM/kWh}$  Schmelzfaser-Masseanteil:  $10\%$  bei der Krempel,  $50\%$  beim aerodynamischen Verfahren; Jahresproduktion  $75.000 \text{ m}^3$ , jährliche Maschinenlaufzeit  $4.760 \text{ h}$

Herstellungskosten $\text{DM/m}^3$				
<b>Rohstoff 1)</b>				
Kaufpreis	9,15		5,10	
Transport	2,15		1,20	
<b>Faserherstellung 1)</b>				
Riffelwalzenanlage	20,30		11,30	
Sägezahnwalzenanlage		13,05		7,25
<b>Mattenherstellung + -verfestigung 1)</b>				
Krempel	27,70	27,70		
aerodynamisches Verfahren			19,70	19,70
Schmelzfaser	10,75	10,75	53,95	53,95
<b>Nachbehandlung</b>				
Imprägnierung			9,55	
Zuschnitt			0,30	
<b>GESAMTKOSTEN</b>	<b>79,90</b>	<b>72,65</b>	<b>101,10</b>	<b>97,05</b>

1) auf Endprodukt bezogen

### 4.2.2 Rohrkolben-Schüttgut

Für das Rohrkolben-Rohmaterial und die Prozeßschritte Zerkleinern und Trennen ist, je nach angewandtem Verfahren, mit Kosten in Höhe von 14 bis 31 DM/m<sup>3</sup> zu rechnen [4]. Die Verdichtung des Schüttgutes zur Wärmedämmschicht erfordert einen zusätzlichen Materialaufwand, der mit abnehmenden Werten der Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 12 bis 37 DM/m<sup>3</sup> zunimmt. In der Darstellung der Veränderung der Gesamtkosten für 1 m<sup>3</sup> eingebaute Wärmedämmschicht mit der Wärmeleitfähigkeit (Bild 5) zeigt sich deshalb, daß die Kosten mit abnehmenden Werten der Wärmeleitfähigkeit deutlich ansteigen. Im Bereich der gemessenen Wärmeleitfähigkeits-Werte ergibt sich kein Kostenminimum. Die Kosten von 40 DM/m<sup>3</sup> für eine Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/(mK) können jedoch als Minimum angesehen werden, da Schüttungen mit höherer Wärmeleitfähigkeit kaum Marktchancen haben.

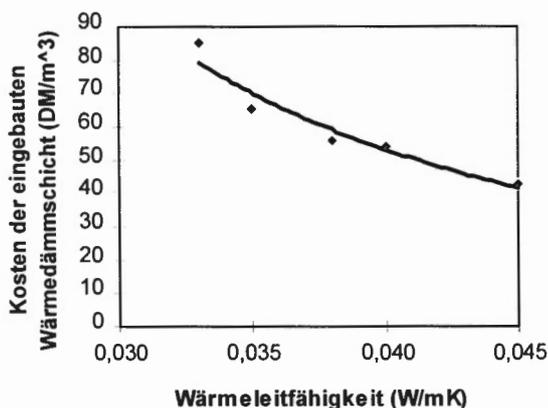


Bild 5: Veränderung der Gesamtkosten der Rohrkolben-Wärmedämmschicht mit der Wärmeleitfähigkeit [5]

Fig. 5: Variation of total costs of cattail bulk heat insulation layer with thermal conductivity [5]

Berechnungsannahmen: Jahreskosten für Personal, Maschinen (Investitionen u. Reparaturen) u. Energie (0,18 DM/kWh), Zins: 8,5 % p. a., Betrachtungszeitraum 10 Jahre, jährliche Reparaturkosten: 10 % des Investitionsbetrages; Jahresproduktion: 4.000 m<sup>3</sup>, Maschinenlaufzeit: 1.200 h/a

### 4.2.3 Vergleich mit marktüblichen Wärmedämmstoffen

Ein Vergleich der volumenbezogenen Herstellungskosten mit den Marktpreisen marktüblicher, vergleichbarer Wärmedämmstoffe (s. 2.3) zeigt, daß die genannten minimalen Herstellungskosten von etwa 73 DM/m<sup>3</sup> für Flachsfaser-Wärmedämmplatten und von 40 DM/m<sup>3</sup> (ohne Imprägnierung und Transport) für das Rohrkolben-Schüttgut die Festlegung konkurrenzfähiger und gleich-

zeitig einträglicher Marktpreise ermöglichen sollten. Die Produktion von Flachsfaser-Wärmedämmstoffen wurde deshalb bereits aufgenommen und wird im Jahr 1998 verstärkt.

### 4.3 Primärenergieaufwand

#### 4.3.1 Flachsfasermatten

Die Herstellung der Flachsfaser-Wärmedämmplatten erfordert einschließlich des Primärenergieaufwands für den Flachsanzbau eine volumenbezogene Primärenergie von ca. 265 MJ/m<sup>3</sup> [3]. Dabei entfallen lediglich ca. 15 MJ/m<sup>3</sup> auf den Betrieb der zur Fasergewinnung und Vliesbildung nötigen Maschinen. Die restlichen 250 MJ/m<sup>3</sup> werden für den Anbau und die Ernte der Flachspflanzen benötigt.

#### 4.3.2 Rohrkolben-Schüttgut

Für die Herstellung einer Wärmedämmschicht aus Rohrkolben-Schüttgut errechnet sich ein Gesamt-Primärenergieaufwand von etwa 215 MJ/m<sup>3</sup> [4]. Der Energieaufwand der Zerkleinerungs- und Trennungsvorgängen zur Herstellung des Rohrkolben-Schüttgutes bewegt sich zwischen 4 und 11 MJ/m<sup>3</sup>. Der Energieaufwand für die Verdichtung hängt von ihrem Grad ab. Bei einer Verdichtung von 50 %, wie sie für Dachflächen zu empfehlen ist, werden 2,5 MJ/m<sup>3</sup> benötigt. Zum Primärenergieaufwand für den Anbau und die Ernte der Pflanze liegen keine spezifischen Daten vor. Unterstellt man einen Aufwand von 20.000 MJ/ha, wie er bei landwirtschaftlichen Kulturen üblich ist [7], und einen Ertrag von 100 m<sup>3</sup>/ha, so ergibt sich ein Primärenergieaufwand von 200 MJ/m<sup>3</sup> für den Anbau und die Ernte.

#### 4.3.3 Vergleich mit marktüblichen Wärmedämmstoffen

Im Vergleich zu den in 2.3 genannten Werten von 1800 - 2500 MJ/m<sup>3</sup> für den Primärenergieaufwand bei der Herstellung von künstlichen Wärmedämmstoffen bestätigen die für Flachsfaser-Wärmedämmplatten und Rohrkolben-Schüttgut ermittelten Werte von 265 bzw. 215 MJ/m<sup>3</sup>, daß die Produktion der biogenen Wärmedämmstoffe auch bezüglich der Schonung von Energieressourcen bei der Herstellung interessant ist.

Für die Flachsfaser-Wärmedämmplatten läßt sich eine primärenergetische Amortisationszeit von 3 Monaten ermitteln [3, 6], im Vergleich zu ca. 10 Monaten für künstliche Mineralfaserprodukte und ca. 13 Monaten für die Kunststoff-Hartschäume.

## 5 Zusammenfassung

Es wurde nachgewiesen, daß sich die Wärmeleitfähigkeit von Flachsfaserver-Wärmedämmplatten und von einer Schüttung aus Rohrkolbenpartikeln über die Strukturgrößen Faser- bzw. Partikeldurchmesser und die Roh- bzw. Schüttdichte beeinflussen läßt. Die Meßergebnisse bestätigen ein für Faser-Wärmedämmstoffe entwickeltes Wärmetransportmodell.

Bei Flachsfasern führen Faserdurchmesser im Bereich unter 35 µm und Rohdichten im Bereich 40-70 kg/m<sup>3</sup> zum minimalen Wert der Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(mK). Die Kosten für die Herstellung von Flachsfaserver-Wärmedämmplatten mit dieser Wärmeleitfähigkeit betragen in der kostengünstigsten Kombination von Herstellungsverfahren etwa 73 DM/m<sup>3</sup>. Als Primärenergieaufwand für Anbau, Ernte und Herstellung ergeben sich etwa 265 MJ/m<sup>3</sup>.

Eine Rohrkolben-Wärmedämmplatte mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/(mK) kostet etwa 40 DM/m<sup>3</sup>. Der Primärenergieaufwand liegt bei etwa 215 MJ/m<sup>3</sup>.

Diese Ergebnisse zeigen, daß sich aus beiden pflanzlichen Rohstoffen Wärmedämmstoffe herstellen lassen, die wegen der erzielbaren Wärmeleitfähigkeit sowie wegen der Kosten und des Primärenergieaufwands bei der Herstellung Marktchancen besitzen sollten. Bei Flachsfaserver-Wärmedämmplatten ist dies bereits nachgewiesen. Die Produktion ist schon seit einiger Zeit angelaufen und wird im Jahr 1998 verstärkt.

## Literatur

- [1] GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie): Baumarktstatistik. Hamburg, 1997
- [2] Larkin, B. K.; Churchill, S. W.: Heat Transfer by Radiation through Porous Insulations. A.I. Ch. E. Journal, 5 (1959), Nr. 4, S. 467-473
- [3] Ringleb, A.: Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus Lein und deren ökonomische und ökologische Bewertung. Dissertation, TU München-Weihenstephan, 1996
- [4] Batschkus, V.: Verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeleitfähigkeit einer Schüttdämmung aus Rohrkolben (*Typha spec.*) sowie ökonomische und ökologische Bewertung dieser Maßnahmen. Dissertation, TU München-Weihenstephan, 1998
- [5] Sörensen, C.: Wärmedämmstoffe im Vergleich. München: Umweltinstitut München, 1994
- [6] Madeker, U.: Wärmedämmung aus nachwachsenden Rohstoffen. Ökonomie und Ökologie des Dämmstoffes Faserlein. Diplomarbeit, Fachhochschule Freising-Weihenstephan, 1995
- [7] Reinhardt, G.: Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung nachwachsender Rohstoffe. Heidelberg: Vieweg Verlag, 1993