Gemeinsamer Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen

Durchgeführt im Auftrag des
Bundesministeriums für Ernährung,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
(BMELV)

Betreut durch die
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
(FNR)

Bearbeitet von

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH
Institut für Betriebstechnik und Bauforschung
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
TU Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Fraunhofer-Institut für Holzforschung
Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)
Im Unterauftrag: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Das o. g. Verbundvorhaben wurde von Juli 2004 bis Juni 2007 in fünf eigenständigen Teilvorhaben bearbeitet. Die Koordination oblag dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen. Im Berichtszeitraum wurden Fachgespräche zwischen den Projektpartnern in Braunschweig und in Dresden durchgeführt. Mit dem Wilhelm-Klauditz-Institut bestanden bezüglich des Projekts informative Kontakte. Wo möglich, wurden dem WKI vom IBP Probematerialien überlassen.

Die Verantwortung für die Koordination des Gesamtvorhabens und die fachliche Verantwortung für das Teilvorhaben 1 lagen beim Fraunhofer-Institut für Bauphysik als Projektkoordinator.

Die fachliche Verantwortung für die weiteren Teilvorhaben lag jeweils bei den bearbeitenden Forschungseinrichtungen.

Inhalt

1	**Teilvorhaben 1: Schimmelpilzresistente und emissionsarme Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen**	**1**
1.1	Ausgangssituation und Fragestellung	1
1.2	Chemische Untersuchungen	1
1.2.1	Ergebnisse	2
1.2.2	Fazit	3
1.3	Geruchliche Untersuchungen	4
1.3.1	Humanolfaktometrie	4
1.3.2	Geruchsaufklärungen	4
1.3.3	Ergebnisse	5
1.4	Mikrobiologische Untersuchungen	7
1.4.1	Experimentelles Konzept der Isoplethenbestimmung, Umsetzung	7
1.4.2	Vorgehensweise	7
1.4.3	Materialspezifische Isoplethensysteme	12
1.4.4	Potenzielle Schadenverursacher, Vorbelastung	12
1.4.5	Ergebnisse	13
1.4.6	Fazit	15
1.5	Zusammenfassung und Ausblick	15
1.6	Literatur	17
1.7	Anhang 1: Tabellen	19
1.8	Anhang 2: Bilder	52
2	**Teilvorhaben 2: Entwicklung einer Methode zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen**	**1**
2.1	Thema des Forschungsvorhabens	81
2.2	Aufgaben- und Zielstellung	81
2.3	Ausgangssituation	82
2.3.1	Allgemeine Informationen zu Schimmelpilzen	82
2.3.2	Europäische Gesetzgebung und Normung	84
2.3.3	Anforderungen an die Schimmelpilzbeständigkeit	85
2.3.4	Bestimmung und Bewertung der Schimmelpilzresistenz	86
2.3.5	Schimmelpilzbefall an Wärmedämmstoffen in der Praxis	87
2.4	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	90
2.4.1	Auswahl und Charakterisierung relevanter Dämmstoffe	90
2.4.1.1	Übersicht der Materialien	90
2.4.1.2	Untersuchung des pH-Wertes	91
2.4.1.3	Untersuchung des Feuchteverhaltens	93
2.4.1.4	Analyse fungizider Additive	95
2.4.2	Methodenentwicklung	97
2.4.2.1	Prüfvarianten	98
2.4.2.2	Prüfpilze	99
2.4.2.3	Prüfkörpervorbereitung und Prüfanordnung	104
2.4.2.4	Herstellung der Sporensuspension	105
2.4.2.5	Beimpfung	105
2.4.2.6	Prüfklima	106
2.4.2.7	Nährstoffzusätze	109

2.4.2.8 Bonitierung/Klassifizierung 110
2.4.3 Vergleichende Schimmelpilzprüfung 111
2.4.3.1 Prüfung nach bisher eingesetzten Methoden 111
2.4.3.2 Prüfung nach der IHD-Methode VA 20-24/1 115
2.4.3.3 Vergleichsuntersuchungen 116
2.4.4 Wirksamkeit potenzieller fungizider Zusätze 117
2.5 Verwertung der Ergebnisse 117
2.6 Zusammenfassung und Diskussion 120
2.7 Literatur 123
2.8 Anlagen 126

3 Teilvorhaben 3a: Untersuchungen zur Optimierung des Brandverhaltens unter besonderer Berücksichtigung von Wärmeleitfähigkeit und Materialfeuchte 142
3.1 Einleitung, Problem- und Zielstellung 142
3.2 Material und Methoden 143
3.2.1 Auswahl der Produkte und Materialien 143
3.2.2 Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit 143
3.2.2.1 Messmethode 143
3.2.2.2 Probenvorbereitung 145
3.2.2.3 Versuchsergebnisse 146
3.2.3 Untersuchung des Feuchtigkeitsverhaltens 148
3.2.3.1 Bestimmung der Ausgleichsfeuchte nach DIN EN 12429 148
3.2.3.2 Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten 152
3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion 155
3.4 Literatur 158
3.5 Tabellen und Abbildungen 160

4 Teilvorhaben 3b: Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene 181
4.1 Einleitung 181
4.1.1 Ausgangssituation 181
4.1.2 Zielsetzung 182
4.2 Zusammenstellung aktueller Einsatzmöglichkeiten brennbarer Dämmstoffe 182
4.2.1 Musterbauordnung 182
4.2.2 M-HFHHolzR: Muster-Holzbaurichtlinie 188
4.2.3 M-IndBauRL: Muster-Industriebaurichtlinie (2000) 188
4.2.4 MBeVO: Muster-Beherbergungsstättenverordnung (2000) 190
4.2.5 MGarVO: Muster-Garagenverordnung (1997) 191
4.2.6 MVkVO: Muster-Verkaufsstättenverordnung (1995) 192
4.2.7 MVStättV: Muster-Versammlungsstättenverordnung 193
4.2.8 MSchulbauR: Muster-Schulbaurichtlinie (1998) 194
4.2.9 MHochhausRL: Muster-Hochhausrichtlinie (1981) 194
4.2.10 Zusammenfassung und Bewertung 194
4.3 Überblick der Situation bei den europäischen Normungsverfahren 194
4.3.1 Gesetzliche Anforderungen an Bauprodukte 195
4.3.1.1 Bauproduktenrichtlinie 196
4.3.1.2 Grundlagendokumente 197
4.3.1.3 Mandate 197
4.3.1.4 EOTA 197
4.3.1.5 CEN / CENELEC 197

4.3.1.6 ETAG 198
4.3.1.7 ETA 198
4.3.1.8 Harmonisierte EN-Norm 198
4.3.1.9 Bauproduktengesetz 198
4.3.1.10 Musterbauordnung 201
4.3.1.11 Rechts- und Verwaltungsvorschriften 202
4.3.1.12 Bauregelliste 202
4.3.2 Liste der Technischen Baubestimmungen 204
4.3.3 Gegenüberstellung der nat. und europ. Baustoffklassifizierung 204
4.3.3.1 Nationales Klassifizierungsverfahren nach DIN 4102-1 204
4.3.3.2 Europäische Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 207
4.3.4 Zusammenfassung 212
4.3.5 Europäische Technische Zulassung für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen 213
4.4 Auswahl der Produkte 217
4.5 Charakterisierung des Brandverhaltens im Labormaßstab 218
4.5.1 Untersuchungen im Cone-Kalorimeter 218
4.5.1.1 Herstellung der Probekörper 219
4.5.1.2 Versuchsdurchführung 222
4.5.1.3 Versuchsergebnisse: 223
4.5.2 Thermogravimetrische Analyse 227
4.5.2.1 Herstellung der Probekörper 228
4.5.2.2 Versuchsdurchführung 229
4.5.2.3 Versuchsergebnisse 229
4.5.3 Masseverlust 230
4.5.3.1 Herstellung der Probekörper 230
4.5.3.2 Versuchsdurchführung 230
4.5.3.3 Versuchsergebnisse 231
4.5.4 Flammpunktbestimmung 231
4.5.4.1 Herstellung der Probekörper 232
4.5.4.2 Versuchsdurchführung 233
4.5.4.3 Versuchsergebnisse 233
4.6 Durchführung europäischer Klassifizierungsversuche 234
4.6.1 Prüfung nach DIN EN ISO 11925-2 (Kleinbrennertest) 234
4.6.1.1 Herstellung der Probekörper 234
4.6.1.2 Versuchsdurchführung 235
4.6.1.3 Versuchsergebnisse 235
4.6.2 Prüfung nach DIN EN 13823 (Single-Burning-Item) 238
4.6.2.1 Herstellung der Probekörper 239
4.6.2.2 Versuchsdurchführung 239
4.6.2.3 Versuchsergebnisse 240
4.6.3 Vorhersage von SBI-Versuchen auf Basis des Cone-Kalorimeters 242
4.6.3.1 Beschreibung des Modells 242
4.6.3.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den realen Ergebnissen 246
4.6.4 Untersuchung des Glimmverhaltens 247
4.6.4.1 Herstellung der Probekörper 248
4.6.4.2 Versuchsdurchführung 249
4.6.4.3 Versuchsergebnisse 249
4.6.4.4 Beurteilung des Prüfverfahrens 250
4.7 Optimierungen hinsichtlich der europ. Baustoffklassifizierung 251
4.7.1 Verbesserung des Baustoffverhaltens als Materialeigenschaft 252
4.7.1.1 Herstellung der Probekörper 253

4.7.1.2 Untersuchung des Brandverhaltens im Cone-Kalorimeter 254
4.7.1.3 Versuchsergebnisse (Cone-Kalorimeter) 255
4.7.1.4 Durchführung von Kleinbrennerversuchen 260
4.7.1.5 Durchführung eines SBI-Versuchs 262
4.7.2 Verbesserung des Baustoffverhaltens durch Einbaubedingungen 263
4.8 Anwendung brennbarer Dämmstoffe im mehrgeschossigen Holztafelbau 264
4.8.1 Ausgangssituation 264
4.8.2 Anforderungen an die Brandschutzbekleidung bei Verwendung brennbarer Dämmstoffe 265
4.9 Bestimmung der thermischen Grenztemperatur 266
4.9.1 Bestimmung der therm. Grenztemperatur im Cone-Kalorimeter 266
4.9.2 Untersuchung der Rauchgasentwicklung 268
4.10 Durchführung von Normbrandversuchen mit kleinformatigen Bauteilen 269
4.10.1 Versuchsaufbau 269
4.10.2 Bestätigung der Grenztemperatur der thermischen Zersetzung 269
4.10.3 Bestimmung des Einflusses von Fugen in der Brandschutzbekleidung 270
4.10.4 Nachweis des thermischen Schutzes durch Holzwerkstoffplatten 271
4.10.5 Einfluss metallischer Verbindungsmittel 272
4.11 Durchführung eines großmaßstäblichen Normbrandversuchs 273
4.12 Konstruktionsregeln 275
4.12.1 Brandschutzbekleidung 275
4.12.2 Fugen in der unteren Lage der Brandschutzbekleidung 276
4.12.3 Holzwerkstoffplatten als Teil der Brandschutzbekleidung 276
4.12.4 Schrauben, Klammern, Nägel in der Brandschutzbekleidung 276
4.12.5 Elektroinstallationen außerhalb der Bauteile 276
4.13 Zusammenfassung der Ergebnisse 276
4.14 Literatur 279

5 Schnelle Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Werk- und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Abhängigkeit vom Materialfeuchtegehalt und dem Dichteprofil 282
5.1 Einleitung 282
5.2 Untersuchungsmaterial 282
5.3 Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 283
5.3.1 Zweiplatten-Verfahren 283
5.3.2 Einplatten-Verfahren 284
5.4 Instationäre Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 285
5.4.1 Hardware - Messstreifen: 286
5.4.2 Hardware - Messeinrichtung: 287
5.5 Optimierung des Messinstruments 289
5.5.1 Hardware – Heizstreifen 289
5.6 Softwareentwicklung 291
5.6.1 Messdatenaufnahme 291
5.6.2 Auswertungssoftware 291
5.7 Voruntersuchungen 293
5.7.1 Rohdichtebestimmung von festen Untersuchungsmaterialien 293
5.7.2 Materialfeuchten 294
5.7.3 Störeinflüsse 294
5.7.3.1 Elektromagnetische Felder 295
5.7.3.2 Strom- und Spannungsschwankungen 295
5.7.3.3 Luftfeuchte 295
5.7.3.4 Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen 295

5.7.3.5 Wahl des Heizstroms 296
5.7.3.6 Wiederholbarkeit des Anpressdrucks 296
5.7.3.7 Oberflächenbeschaffenheit 297
5.7.3.8 Langzeitverhalten 297
5.8 Hauptuntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit 297
5.8.1 Durchführung 297
5.8.2 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen 298
5.8.2.1 Materialfeuchteabhängigkeit 298
5.8.2.2 Dichteabhängigkeit 299
5.8.2.3 Partikelgrößeabhängigkeit 299
5.9 Zusammenfassung 302
5.10 Literatur 304
5.11 Anlagen 305

1 Teilvorhaben 1: Schimmelpilzresistente und emissionsarme Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen

1.1 Ausgangssituation und Fragestellung

Baustoffe, insbesondere Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen werden als ökologisch vorteilhaft und gesundheitlich unbedenklich angesehen. Trotzdem liegen die Verkaufszahlen weit hinter denen der konventionellen Dämmstoffe. Verantwortlich dafür sind nicht nur höhere Anschaffungskosten sondern vor allem auch Vorbehalte hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, der Freisetzung von organischen Stoffen, vor allem von Geruchsstoffen in die Raumluft und der Beständigkeit gegen mikrobiellen Befall. Letztere ist insbesondere nach Schadensfällen, wie z. B. dem Eindringen von Feuchte in die Konstruktion von Bedeutung wenn geeignete Sanierungsmaßnahmen ausgewählt und durchgeführt werden müssen. Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsvorhabens wurde den Fragen bezüglich der Emissionen von flüchtigen organischen Stoffen und der mikrobiellen Beständigkeit nachgegangen. Die Ziele des Teilvorhabens 1 lassen sich wie folgt benennen:

- Gewinnung von Daten hinsichtlich der möglichen Freisetzung organischer Stoffe in die Innenraumluft
- Bewertung der Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen anhand des aktuellen AgBB-Schema
- Gewinnung von Daten hinsichtlich einer möglichen Geruchsbeeinträchtigung in Innenräumen durch Freisetzung geruchsaktiver Stoffe
- Identifikation der maßgeblich geruchsaktiven Stoffe
- Untersuchungen zur mikrobiellen Beständigkeit
- Abschätzung der Schadentoleranz bei Feuchtschäden hinsichtlich mikrobiellen Befalls.
- Einteilung der Dämmstoffe in Schadenstoleranzklassen.

1.2 Chemische Untersuchungen

Die Emissionsuntersuchungen an ausgewählten Baustoffen wurden in Anlehnung an Zulassungsgrundsätze für Bodenbeläge in Aufenthaltsräumen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) [1] durchgeführt.

Grundlage für die Prüfkammeruntersuchungen ist das sog. Modellraumkonzept, das bereits im ersten Zwischenbericht ausführlich erläutert wurde. Davon ausgehend legt das AgBB-Schema [3] einen Raum mit einer Grundfläche von 3 m x 4 m und einer Raumhöhe von 2,7 m zugrunde, in dem ein Luftwechsel von $Q = 0{,}5\ h^{-1}$ herrscht. Im Rahmen der Zulassungsgrundsätze ist bislang nur für die Produktgruppe der Bodenbeläge eine flächenspezifische Lüftungsrate q für das Prüfkammerexperiment nach DIN EN ISO 16000-9 [2] festgelegt. Für die Emissionsuntersuchungen an den ausgewählten Baustoffen (Tabelle 1), die nicht ausschließlich im Bodenbereich eingebaut werden, wurden deshalb je nach deren Einsatzge-

biet angepasste flächenspezifische Lüftungsraten q errechnet. Grundlage für die Errechnung flächenspezifischer Lüftungsraten sind die Verhältnisse im Modellraum (Verhältnis der frei emittierenden Flächen, die mit dem zu prüfenden Bauprodukt bedeckt sind zum Volumen des Modellraums) laut AgBB-Schema. In Tabelle 2 sind die resultierenden flächenspezifischen Lüftungsraten für unterschiedliche Einbauszenarien wiedergegeben.

Je nach Einsatzgebiet des untersuchten Dämmstoffes wurde für das 28-tägige Prüfkammerexperiment ein geeignetes Szenario ausgewählt (Tabelle 3). Die Emissionsuntersuchungen wurden nach DIN EN ISO 16000-9 [2] in Emissionsprüfkammern aus elektropoliertem Edelstahl mit einem Volumen von 200 L bzw. 1 m³ durchgeführt. Die Aufreinigung der zugeführten Pressluft erfolgte über Aktivkohle- und Partikelfilter. Die Bedingungen in den Prüfkammern sind in Tabelle 4 wiedergegeben. In Tabelle 5 finden sich die angewandten Probenahme- und Analysenverfahren.

Die Bewertung der Emissionen aus den untersuchten Bauprodukten erfolgte nach dem AgBB-Schema [3]. Für die Einzelstoffbewertung wurde die NIK-Werte-Liste Stand September 2005 [3] herangezogen. Die NIK-Werte-Liste wird jährlich aktualisiert. Die Kriterien des AgBB-Schemas für die Eignung von Baustoffen für den Einsatz in Innenräumen sind in [3] zusammengefasst und in Tabelle 6 wiedergeben.

1.2.1 Ergebnisse

Die untersuchten Bauprodukte wiesen sehr unterschiedliches Emissionsverhalten auf. Es lassen sich – in gewissen Grenzen – für einige Produktgruppen typische Emissionsmuster erkennen.

Bei den Einblasdämmungen aus Cellulosefasern dominieren Cluster aus nicht näher identifizierbaren Verbindungen das Emissionsbild (Bild 3). Ausschlaggebend für das Ausmaß dieser Clusterbildung sind die Ausgangsstoffe für die Herstellung der Cellulosefaser. Wird für die Herstellung der Flocken rein weißes Papier verwendet, so ist der Substanzcluster wesentlich schwächer ausgeprägt als beim Einsatz von Pappmaché oder bedrucktem Altpapier. Es kann daher angenommen werden, dass Reste von Druckfarben wesentlich zu der Gesamtemission der Cellulosefasern beitragen. Diese Substanzcluster müssen, so die darin enthaltenen Einzelstoffe nicht identifizierbar sind, als sog. „Stoffe ohne NIK“ eingestuft werden, für die eine Grenze von 100 µg/m³ gilt. Dies kann dazu führen, dass derartige Produkte – immer unter Berücksichtigung des angenommenen Einbauszenarios - die Bedingungen des AgBB-Schemas nicht erfüllen. Die Dämmplatte aus Cellulosefasern weist aufgrund ihrer geschlosseneren Oberfläche weit weniger Emissionen auf als die Einblasdämmungen (Bild 4). Hier dominiert die Essigsäure das Emissionsgeschehen.

Bei der Flachsmatte G (Tabelle 12) betrug der TVOC am Tag 28 31 µg/m³. Einziger für die AgBB-Bewertung relevanter Stoff war die Essigsäure. Die Flachsmatte K (Tabelle 13) wies einen höheren TVOC (TVOC 59 µg/m³) und SVOC-Emissionen (28 µg/m³) auf. Der größte Abteil der VOC- und der SVOC-Emissionen geht auf einen nicht auftrennbaren Stoffcluster zurück, der sich über einen Retentionsbereich von 15’ (26,2’ – 41,2’) erstreckt und sowohl VOC als auch SVOC mit einschließt (Bild 5). Zudem war Essigsäure mit einer Konzentration von 12 µg/m³ nachweisbar.

Die Dämmmatte aus Hanffasern (Tabelle 14) wies nach 28 Tagen mit 2 µg/m³ sehr geringe Emissionen auf (Bild 6). Auch die Stopfwolle aus Hanffasern war sehr emissionsarm. Der TVOC gemäß AgBB-Schema betrug 0 µg/m³. SVOC und VVOC wurden ebenfalls mit jeweils 0 µg/m³ berechnet.

Bei allen Dämmplatten aus Holzfasern (Tabelle 16 – Tabelle 18) wurden die Gesamtemissionen durch die Essigsäure dominiert, die auch bei der Geruchsstoffaufklärung mittels GC-O Analyse bestätigt werden konnte. Von den weiteren Stoffen, die aus den Holzprodukten emittiert wurden, ist wegen seiner niedrigen NIK von 20 µg/m³ Furfural zu nennen (Bild 7). Die Konzentrationen an Essigsäure (1630 µg/m³) und an Furfural (84 µg/m²) in der Prüfkammerabluft führen bei der Holzfaser-Dämmplatte M2 zu einem R-Wert von 7,5 und somit zu einer Überschreitung der AgBB-Kriterien.

Beide Schüttdämmungen aus Roggengranulat stellten sich als emissionsarm dar. Essigsäure konnte in einem der beiden Produkte (Roggengranulat W2) noch am Tag 28 nachgewiesen werden (Tabelle 20).

Die Dämmmatte aus Schafwolle wies hohe Emissionen (1172 µg/m³) an 1,2-Dihydroxypropan auf. Daraus errechnet sich ein R-Wert von 3,663. Die AgBB-Kriterien wurden somit nicht eingehalten. 1,2-Dihydroxypropan wird nicht als genuiner Inhaltsstoff von Schafwolle angesehen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es im Laufe des Verarbeitungsprozesses in die Schafwolle gelangte. Bei der Untersuchung der Schafwolle hinsichtlich möglicher Emissionen am flüchtigen aminoiden Verbindungen konnten N,N-Dibutylamin, Diethanolamin, Cyclohexylamin, Triethylamin, N,N-Dibenzylamin und N,N-Dimethylcyclohexylamin nachgewiesen werden. Die Konzentrationen der einzelnen Amine lagen dabei durchweg unter 0,5 µg/m³.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass unter den in Tabelle 3 aufgeführten Szenarien

- bei keinem der geprüften Produkte Emissionen von Cancerogenen der EU-Kategorien I und II nachgewiesen werden konnten,
- bei den geprüften Celluloseprodukten das Ausgangsmaterial (bedrucktes vs. unbedrucktes Papier) einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsbild, insbesondere auf die Ausprägung des Clusters an nicht näher identifizierbaren Stoffen hat,
- sich die geprüften Flachs- und Hanf- und Roggenprodukte durch niedrige Gesamtemissionen auszeichnen,
- die Essigsäureemissionen bei Holzfaser-Dämmplatten in zwei Fällen zu einer Überschreitung des R-Wertes führen.
- die geprüften Schüttdämmungen aus Roggengranulat nur geringe Eigenemissionen aufweisen,
- die Dämmmatte aus Schafwolle auffällig hohe Emissionen an 1,2- Dihydroxypropan zeigt, die zu einer Überschreitung des R-Wertes führt.

1.2.2 Fazit

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse fällt in erster Linie die Häufigkeit der Essigsäureemissionen auf. Inwieweit Änderungen beim Erntezeitpunkt bzw. im Verarbeitungsprozess die Essigsäure-Freisetzung positiv beeinflussen können, sollte überprüft werden. Ebenfalls einer eingehenderen Betrachtung

bedürfen die hohen Emissionen an 1,2-Dihydroxypropan bei der geprüften Schafwollmatte.

Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass das Modellraumszenario in der vorliegenden Untersuchung von frei emittierenden Oberflächen ausging. Im Anwendungsfall werden die Dämmstoffe verbaut, d. h. es existieren keine Dämmstoffoberflächen, die in unmittelbarem Kontakt mit der Innenraumluft stehen. Aus den im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten Werten kann somit nicht auf eine VOC-Belastung der Raumluft extrapoliert werden.

1.3 Geruchliche Untersuchungen

1.3.1 Humanolfaktometrie

Nachdem seit Beginn der Untersuchungen kein Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen einen extrem intensiven Eigengeruch aufwies, wurden die wenigen, die durch einen deutlichen Geruch bei der Vorbereitung der Emissionsmessungen auffielen, wie die Holzfaserplatte oder die Hanfmatte ohne aufwendige humanolfaktometrische Geruchsbewertung ausgewählt und genauer auf die emittierten Geruchsstoffe hin analysiert. Als Gegenbeispiel wurde die kaum auffällige Schüttdämmung aus Roggengranulat betrachtet. Die Ergebnisse dazu finden sich im 2. Zwischenbericht. Bei den seitdem durchgeführten emissionstechnischen Untersuchungen fiel ebenfalls kein weiterer Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen geruchlich besonders auf: eine Holzfasermatte, wovon eine vergleichbare bereits geprüft wurde und Schafwolle als leicht geruchsauffälliges Dämmmaterial tierischer Herkunft.

1.3.2 Geruchsaufklärungen

Für die gaschromatografisch-olfaktometrischen (GCO) Untersuchungen wurden von den ausgewählten Materialien (Tabelle 21) jeweils 50 g bzw. 100 g aus den von den Herstellern zur Verfügung gestellten flächigen Dämmstoffen (Dämmmatte aus Hanffasern, Holzfaserplatte, Dämmmatte aus Schafwolle) herausgeschnitten bzw. 100 g von der Schüttdämmung (Roggengranulat) in ein 3 L Glasgefäß gegeben und mit einem Deckel mit Septumaufsatz luftdicht verschlossen. Das Gefäß wurde 24 h bei Raumtemperatur äquilibriert. Um den Einfluss der Feuchte auf die Freisetzung von geruchsaktiven Stoffen abschätzen zu können wurden zusätzlich 50 g der Dämmmatte aus Schafwolle über 200 mL Wasser äquilibriert. Anschließend wurden Gasraumproben für die Analyse mittels Gaschromatografie-Olfaktometrie entnommen. Die Probenvolumina (Tabelle 21) wurden mittels einer Pumpe auf ein Adsorber-Röhrchen, gefüllt mit Tenax TA®, gezogen, thermisch desorbiert und automatisch in den GC für die Analyse auf Geruchsstoffe injiziert. Die in der Probenluft enthaltenen flüchtigen organischen Verbindungen, also auch die geruchsaktiven Stoffe, werden mittels Gaschromatografie aufgetrennt. Der am Ende der Gaschromatografie-Säule effluierende Gasstrom wird zwischen einem Flammenionisationsdetektor (FID) und einem Sniffing-Port aufgeteilt. Ein erfahrener Proband riecht den Gasstrom ab und markiert im FID-Chromatogramm die Stellen, an denen geruchsaktive Stoffe effluieren und beschreibt, soweit möglich, gleichzeitig die wahrgenommene Geruchsqualität. Diese Prozedur wird auf zwei verschieden polaren Kapillarsäulen durchgeführt und jeweils die relative Retentionszeit der

Geruchsstoffe zu den n-Alkanen Pentan bis Hexadecan bestimmt (Retentions- oder Kovats-Index). Anschließend werden in Verdünnungsexperimenten immer geringere Probenvolumina untersucht bis schließlich keine geruchsaktiven Stoffe mehr detektiert werden können (sog. Verdünnungsanalyse). Dadurch kann eine Wichtung der Geruchsstoffe hinsichtlich ihres Beitrags zum Gesamtgeruch getroffen werden; in geringen Probenvolumina werden nur noch die wichtigsten Geruchsstoffe wahrgenommen, nämlich die, die in hohen Konzentrationen in der Probe enthalten sind oder sich durch ihre sehr niedrigen Geruchsschwellen auszeichnen. Für derartige Stoffe stellt die menschliche Nase den empfindlichsten aller bekannten Detektoren dar, der Geruchsstoff-Konzentrationen wahrnehmen kann, die auch in einem massenselektiven Detektor (Massenspektrometer) kein Signal mehr ergeben (so genannter Basisliniengeruch). Diese Tatsache erschwert im Einzelfall oft eine strukturelle Identifizierung von Geruchsstoffen. Eine Identifizierung erfolgt dann häufig nur durch den übereinstimmenden Geruch hinsichtlich Qualität und Schwelle und die identischen chromatografischen Eigenschaften (Kovats-Index auf mindestens zwei unterschiedlich polaren GC-Säulen) der zu identifizierenden Verbindung mit der Referenzverbindung. Andernfalls werden sehr große Mengen an Material und zahlreiche Aufreinigungs- und Isolierungsschritte nötig um eine für chemische Analysengeräte ausreichend große Substanzmenge zu erhalten (Lösungsmittelextraktion, Säulenchromatographie, etc.).

Im Rahmen der Untersuchung von Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffe auf Emissionen wurden Proben, mit einem deutlichen Eigengeruch für eine detailliertere Analyse emittierender Geruchsstoffe ausgewählt. Dazu zählten bislang geruchsintensivere Proben wie eine Dämmmatte aus Hanf und eine Holzfaserplatte, als auch ein geruchsarmes Material wie das Roggengranulat sowie die Dämmmatte aus Schafwolle. Die Untersuchung erfolgte durch Aromaverdünnungsanalyse aus dem Gasraum mittels Gaschromatografie-Olfaktometrie (GCO). Wahrgenommene Geruchsstoffe wurden anhand von Geruchsqualität, Retentionsindex (relative Retentionszeit im Verhältnis zu n-Alkanen C_5 bis C_{16}) auf zwei Kapillarsäulen unterschiedlicher Polarität (HP-5 und DB-1701) und, sofern erhältlich, Massenspektrum (EI) in Übereinstimmung mit authentischen Referenzverbindungen identifiziert. Die Schafwolle wurde sowohl im angelieferten trockenen Zustand als auch in einer Atmosphäre mit 100% relativer Feuchte untersucht, da vermutet wurde, dass Schafwolle unter feuchten Bedingungen einen stärkeren Geruch entwickeln könnte.

1.3.3 Ergebnisse

Von den am IBP im Rahmen des Projekts vorhandenen Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen war die Hanffaser-Dämmmatte AF (Tabelle 22) am geruchsauffälligsten, auch die Holzfaserplatte M1 (Tabelle 23) zeigte noch einen deutlich wahrnehmbaren Geruch, während das Roggengranulat W2 hinsichtlich des Geruchs sehr unauffällig war. Dies zeigte sich auch deutlich in den für die Verdünnungsanalyse zu untersuchenden Probenvolumina aus der Gasphase über je 100 g des jeweiligen Produkts. Während bei der Hanfmatte in 100 mL Gasphase einige Geruchsstoffe noch deutlich wahrnehmbar waren, waren in 1000 mL Gasphasenvolumina über dem Roggengranulat kaum noch geruchsaktive Stoffe zu detektieren. Die in den jeweiligen Produkten identifizierten Geruchsstoffe sind in

Tabelle 22 bis Tabelle 24 aufgelistet. Die Anzahl der „+“ Zeichen in der Spalte „Beitrag zum Gesamtgeruch“ spiegelt das Ergebnis der Verdünnungsanalyse wider. Je mehr „+“ Zeichen desto eher konnte die Substanz in geringen Probevolumina wahrgenommen werden und entsprechend größer ist ihr Beitrag zum Gesamtgeruch des Materials. Während der Geruch des Roggengranulat sehr schwach war und hauptsächlich durch die eine Verbindung 2-Aminoacetophenon bestimmt wird, setzt sich der Geruch der Hanfmatte und der Holzfaserplatte aus mehreren Stoffen zusammen, von denen einige als wichtig und andere nur als den Geruchseindruck abrundend angesehen werden können.

Der intensive Geruch der Hanfmatte wird v. a. geprägt von grün riechenden Substanzen wie Pentanal, Hexanal und Z-2-Nonenal, süßlich riechendem 2,3-Butandion, Methylbutanal, Phenylacetaldehyd und einer unbekannten Hustenbonbon artig riechenden Substanz, sowie Stoffen mit röstig, würzigen Noten wie z. B. 2-Acetyl-1-pyrrolin, Methanthiol, 3-Methylthiopropanal und 3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanon. Die anderen Substanzen runden den Geruch ab (Tabelle 22).

Der Geruch der Holzfaserplatte wird v. a. bestimmt durch die Aldehyde Pentanal und Hexanal, rauchig riechendes 2-Methoxyphenol (Ligninabbauprodukt), 2-Methyl-3-furanthiol und eine unbekannt stechend, schweflig, bitter, kresseartig riechende Substanz, ergänzt um zahlreiche gesättigte und ungesättigte Aldehyde und Ketone aus dem oxidativen Fettsäureabbau, Essigsäure und nur am Rande durch die Holzterpene α-und β-Pinen.

Der insgesamt sehr schwache Geruch des Roggengranulats wird im Wesentlichen nur von 2-Aminoacetophenon bestimmt. Die anderen Stoffe spielen nur eine untergeordnete, abrundende Rolle (Tabelle 24). Die Identität der mit Fragezeichen versehenen Substanzen, z. B. die nach Hustenbonbon riechende, bleibt zu klären. Unbekannte Stoffe gilt es noch zu identifizieren, v. a. die wichtige kresseartig riechende Substanz in der Holzfaserplatte und evtl. die „muffig“ und die „seltsam“ riechende Substanz in der Hanfmatte.

Von den am IBP im Rahmen des Projekts vorhandenen Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen tierischen Ursprungs wurde lediglich Schafwolle als leicht geruchsauffällig für eine genauere Geruchsanalytik ausgewählt. Die Schafwolle roch dabei schwächer als der geprüfte Hanf oder auch die Holzfaserplatte aber doch stärker als das unauffällige Roggengranulat. Die von Schafwolle emittierten Geruchsstoffe sind in Tabelle 25 aufgelistet. Dabei ergab sich kein großer Unterschied zwischen der trocken und der feucht untersuchten Schafwolle. Über der feuchten Schafwolle wurden einige Geruchsstoffe intensiver wahrgenommen. Außerdem konnten einige wenige Geruchsstoffe mehr detektiert werden. Der Geruch von Schafwolle kann als leicht muffig beschrieben werden, er wird nicht von einer oder wenigen Substanzen bestimmt sondern ergibt sich aus dem Zusammenwirken von ca. einem Dutzend Geruchsstoffen. Neben gesättigten Aldehyden wie Pentanal, Hexanal, Octanal, treten ungesättigte Aldehyde wie (E)- und (Z)-2-Nonenal, Ketone wie 2,3-Butandion, 1-Hexen-3-on, 1-Octen-3-on, aber auch 2-Acetyl-1-pyrrolin und einige Phenole wie p-Kresol, 2-Methoxyphenol sowie zwei unbekannte Stoffe als geruchsbeteiligte Substanzen auf. Die Identität der unbekannten Geruchsstoffe konnte aus den geringen Konzentrationen in der Gasphase über dem Material nicht bestimmt werden, kaum einer der genannten Geruchsstoffe konnte bei der GC-MS Analytik im Rah-

men der Emissionsmessung detektiert werden. Um die Identität dieser Stoffe aufzuklären bedarf es größerer Probenmengen, einer Lösungsmittelextraktion des Materials und zahlreicher Trennungs- und Aufreinigungsschritte sowie komplexerer Analysengeräte.

1.4 Mikrobiologische Untersuchungen

1.4.1 Experimentelles Konzept der Isoplethenbestimmung, Umsetzung

Ausgangssituation

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen werden in ihrem Verhalten gegenüber Feuchte und in ihrer Resistenz gegenüber dem Befall durch Schimmelpilze unterschiedlich eingeschätzt [6]. Obwohl diese Einschätzungen teilweise auch auf Bewertungen im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen beruhen, fehlen jedoch grundlegende Daten zum Verhalten dieser Stoffe unter der gesamten Breite der möglichen Randbedingungen. Insbesondere bestehen bisher keine Auswertungen hinsichtlich des Isoplethenmodell [7], [8]. Die hier vorgestellte Prüfeinrichtung soll die experimentellen Möglichkeiten aufzeigen zur temperatur- und luftfeuchteabhängigen Bestimmung des Schimmelpilzrisikos von verschiedenen Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen [9] Mit dieser Prüfeinrichtung ist es möglich, die Randbedingungen sehr genau zu erfassen und zu kontrollieren, schließlich können aus den gemessenen Daten Isoplethenbereiche und Isoplethensysteme abgeleitet und errechnet werden. Gerade durch die Ermittlung von materialspezifischen Isoplethenbereichen und/oder –systemen wird es möglich sein gezielter maßgeschneiderte Materialverbesserungen (unter Einbeziehung von Daten über die chemische Zusammensetzung) zu erreichen. Zusätzlich helfen die Untersuchungsergebnisse natürlich auch im Rahmen von Zulassungsverfahren, den sicheren Einsatzbereich der speziellen Produkte besser abzuschätzen. Darüber hinaus können die gewonnenen Daten auch für die Ermittlung des Schimmelpilzrisikos und die Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen mit Hilfe eines neu entwickelten Berechnungsverfahrens [10] herangezogen werden.

Bisher wurde die spezielle Prüfeinrichtung vor allem zur Charakterisierung von unterschiedlichen Baustoffen verwendet, die vorwiegend nicht den nachwachsenden Rohstoffen zuzurechnen sind [9]. Für die Verwendung der Prüfeinrichtung zur Untersuchung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen mussten verschiedene Parameter angepasst werden.

1.4.2 Vorgehensweise

Materialien

Neben verschiedenen Materialien aus dem Produktbereich der nachwachsenden Rohstoffe wurden zu Vergleichszwecken beim aktuellen Messumfang auch einzelne so genannte konventionelle Dämmstoffe bzw. auch Baustoffe / Materialverbünde auf mineralischer Basis (mit Dämmeigenschaft) miteinbezogen. Zur Übersicht der getesteten Materialien siehe Tabelle 28.

Prüfkörper

Zu Beginn der Untersuchungen wurden Prüfkörper entworfen und hergestellt (insgesamt mehr als 600 Stück). Zur Bestimmung der materialspezifischen Isoplethenbereiche wurden Prüfkörper mit Abmessungen von ca. 5 x 5 cm² in der Fläche und einer Dicke von ca. 2,5 - 5 cm (je nach Material) gestaltet. Bei Dämmmaterialien, die als Matten aufgebracht werden, wurden die Prüfkörper aus dem Material mit den notwendigen Abmessungen herausgearbeitet. Teilweise befinden sich im Untersuchungsprogramm auch Materialien, die lose (z. B. als Einblasdämmstoff) verarbeitet werden. Daher wurden spezielle Körbchen aus rostfreiem Edelstahlgitter gearbeitet, die die Prüfkörper (das Material) aufnehmen. Dadurch ist gewährleistet, dass die verschiedenen Materialien (Matten oder loses Dämmmaterial) unter gleichen Bedingungen getestet werden können. Zusätzlich können die Körbchen auf der Unterlage befestigt werden, wodurch die Prüfkörper bei der Kontrolle nicht verrutschen. Rostfreier Edelstahl wurde gewählt, um nicht das Untersuchungsergebnis (Beurteilung des Aufwuchses) durch potentielle Rostfleckenbildung zu verfälschen. Je Testansatz (Test-Klimate, siehe unten) wurden jeweils drei Parallelen je geprüftem Material angelegt, deren Beobachtungsergebnisse gemittelt wurden (Bild 1).

Bild 1: Unterschiedliche Testprodukte in einer Inkubationseinheit. Durch die verwendeten Körbchen aus Edelstahlgitter können feste und lose Materialien bei gleichen Bedingungen getestet werden.

Sterilisation

Da vorgesehen ist, dass die Prüfkörper mit einer spezifischen Sporensuspension materialrelevanter Pilze (siehe unten) beimpft werden, erscheint eine vorherige Sterilisation der Prüfkörper sinnvoll. Dies wurde durch Anwendung der Gamma-Sterilisation durchgeführt. Gamma-Strahlung eignet sich am Besten zur Sterilisation der Prüfkörper im Rahmen dieses Projektes, da dadurch Beeinflussungen von Materialeigenschaften, z. B. durch hohe Temperaturen und / oder Feuchte (wie bei der Autoklavierung), ausgeschlossen werden können.

Test-Klimate

Während der Testphase werden die Prüfkörper in einzelnen Inkubationseinheiten kontrollierten Bedingungen ausgesetzt (12 verschiedene Klimate; Tabelle 26). Die Test-Klimate (Kombinationen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit) sind so ausgewählt, dass sowohl die Altbausituation mit sehr niedrigen Oberflächentemperaturen, als auch entsprechend gut gedämmte Neubauten mit abgedeckt werden. Für einen ersten Testuntersuchungslauf wurden die relativen Luftfeuchten dabei so konzipiert, dass sie möglichst den gesamten Feuchtigkeitsbereich abdecken, in dem potentiell ein Wachstum der verwendeten Prüfpilze an den unterschiedlichen Materialien erwartet werden könnte. In einen weiteren Schritt können anschließend die jeweiligen materialspezifischen Isoplethenbereiche durch Folgemessungen weiter präzisiert werden. Eine Beschränkung auf ausgewählte Klimate ist erforderlich, um den Untersuchungsumfang auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren.

Prüfpilze

Die Prüfkörper werden in den Inkubationseinheiten für mindestens 48 Stunden auf die jeweiligen Untersuchungsbedingungen vorkonditioniert und anschließend, um eine Pilzbelastung aus der Umgebung zu simulieren, gezielt mit materialrelevanten Mikroorganismen (siehe Tabelle 27) beimpft [11]

Die verwendeten Prüfpilze wurden gezielt ausgewählt. Dabei wurden in erster Linie Arten berücksichtigt, die potentiell auf einer möglichst großen Bandbreite von Materialien wachsen können, als auch Arten die bei den verschiedensten, mikroklimatischen Randbedingungen ihr Optimum haben. Von besonderem Interesse sind relativ trockenheitstolerante Pilzarten, da diese die Anfälligkeitsgrenzen des Materials besonders gut definieren. *Aspergillus versicolor* konnte bei eigenen Untersuchungen regelmäßig auf verschiedenen Baustoffen / Bauteilen gefunden werden. Die Substrate reichen von Putzen über Farben bis hin zu Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen. Ebenso wurden am IBP verschiedene Arten der Gattung *Eurotium* bereits von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen und von anderen Baustoffen isoliert. *Eurotium rubrum* wurde gewählt, da diese Art besonders trockenheitstolerant ist [12]. Ebenso zählt auch *Penicillium chrysogenum* zu den relativ trockenheitstoleranten Pilzen und kann auf einer großen Bandbreite von unterschiedlichen Baumaterialien vorkommen [13]. Für die Untersuchungen wurden auch verschiedene Pilzarten berücksichtigt, die zu den häufigen Luftkeimen zählen. Deren Wachstumsgrenzen liegen nicht unbedingt bei sehr extremen Werten wie bei den vorgenannten Pilzen, besitzen aber dagegen eine größere Toleranz gegen Austrocknung. *Aureobasidium pullulans* kann häufig von verschiedensten Baustoffen, die im Innenraum oder für Außenoberflächen verwendet werden, isoliert werden [12], [13] Darüber hinaus ist dieser im Bereich der Holz-Baustoffe ein verbreiteter Bläuepilz. Das heißt auf cellulosehaltigen Oberflächen kann dieser Pilz, bei geeigneten Randbedingungen, zu dunklen Verfärbungen führen. Die Sporen von *Cladosporium cladosporioides* sind sowohl in der Innenraumluft, als auch in der Außenluft weit verbreitet und häufig. Dieser Pilz ist relativ genügsam und kann mit einem Minimum an Nährstoffen auskommen [13]. *Ulocladium chartarum* ist auf zahlreichen Oberflächen zu finden und zeigt

eine besondere Affinität zu cellulose-haltigen Baustoffen. Darüber hinaus ist dieser Pilz auch auf Putzen bekannt [14]. Ähnlich wie die nah verwandte Gattung *Alternaria* könnten die verschiedenen Arten der Gattung *Ulocladium* eine erhöhte Toleranz gegen bestimmte, biozide Wirkstoffe (z. B. Carbendazim) aufweisen [15]. Als weitere Gruppe wurden Pilze berücksichtigt, die häufig im Rahmen von Feuchteschäden gefunden werden [11]. Die ausgewählten Formen besitzen etwas höhere Feuchtigkeitsansprüche. Bei geeigneten Feuchtebedingungen könnten diese aber in der Lage sein das untersuchte Material anzugreifen. *Chaetomium globosum* ist ein saprophytischer (fäulnisbewohnend) Pilz, der häufig auf cellulose-haltigen Substraten (auch Tapete oder Karton) im Rahmen von Feuchteschäden auftritt [13]. Ebenso wird *Scopulariopsis fusca* regelmäßig bei Feuchteschäden auf unterschiedlichen Substraten beobachtet (IBP-eigene Untersuchungen). Während die bisher diskutierten Pilzarten zu den Schlauchpilzen (Ascomyceten) oder zu den unvollständigen Pilzen (fungi imperfecti) zählen, gehört *Mucor plumbeus* zu den Jochpilzen (Zygomyceten). Arten der Gattung *Mucor* benötigen in der Regel relativ hohe Umgebungs- und Substratfeuchten, besitzen aber dafür eine hohe Wachstumsrate und können ein verwertbares Substrat bei geeigneten Randbedingungen sehr rasch besiedeln [13]. *Rhodotorula mucilaginosa* schließlich ist ein so genannter Hefepilz und gehört zu den Ständerpilzen (Basidiomyceten) [12]. Die ausgewählten Pilze sollen also eine möglichst große ökologische Bandbreite abdecken. Sollte sich im weiteren Verlauf des Projektes ergeben, dass einzelne Pilze im Sinne des Testzieles ausgetauscht werden müssen, so können die zuvor durchgeführten Tests ggf. wiederholt werden. Auf holzzerstörende Ständerpilze (Basidiomyceten), wie den Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) wurde entsprechend der Fragestellung vorläufig verzichtet.

Messungen/Kontrolle

Die bei den unterschiedlichen Klimata inkubierten Prüfkörper werden anfangs täglich, später jeden zweiten bzw. dritten Tag und anschließend bis zum Untersuchungsende (100 Tage nach der Überimpfung) wöchentlich mikroskopisch (Auflichtmikroskop) kontrolliert, und tabellarisch mittels einer eigens entwickelten Schätzskala dokumentiert und fotografiert. Die Gesamtlaufzeit der Versuchsreihe wurde aufgrund der bisherigen Erfahrungen auf 100 Tage ausgedehnt, da nach dieser Zeitspanne nicht mehr mit dem Auskeimen von Sporen aus der Impfsuspension zu rechnen ist [7], und da dann auch ein deutlicheres Ergebnis als bei kürzeren Laufzeiten erwartet werden kann. Über eigens installierte Messfühler, die an einen Messlogger angeschlossen sind, werden die Messklimate aufgezeichnet, um die Konstanz der Randbedingungen zu überwachen und zu dokumentieren.

Messprinzip

In Bild 2 wird der grundsätzliche Aufbau des Messprinzips schematisch wiedergegeben. Ein kontrollierter, gereinigter Luftstrom durchfließt eine Waschflasche mit destilliertem Wasser in einem Taupunktbad, wodurch sich die Luft bei der vorgegebenen Temperatur zu 100% wassergesättigt. Anschließend wird diese wassergesättigte Luft in der jeweiligen Inkubationseinheit auf die gewünschte Temperatur im Brutschrank erwärmt. Auf diese Weise sind konstante Bedingungen bezüglich Luftfeuchtigkeit und Temperatur gewährleistet.

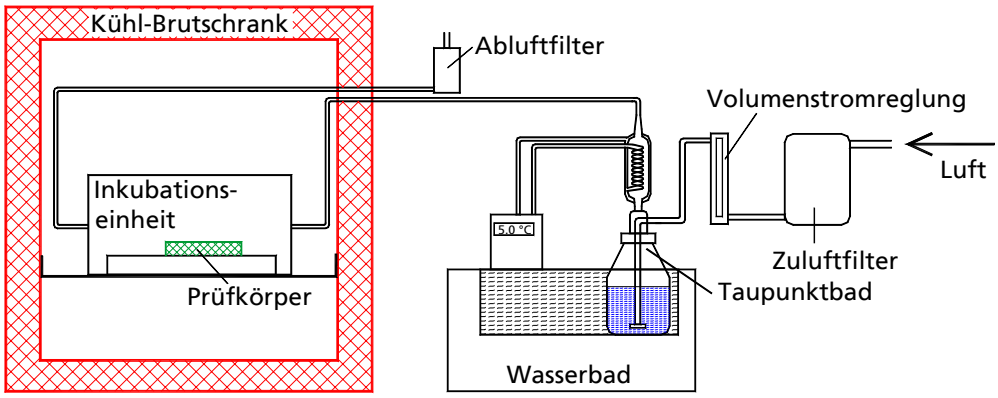


Bild 2: Grundprinzip des Versuchsaufbaus.

1.4.3 Materialspezifische Isoplethensysteme

Unter Isoplethen im hier angewendeten Sinn, sind Kurven gleicher Auskeimzeit bzw. gleichen (Pilz-)Wachstums, bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten, zu verstehen. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Schadenstoleranz unterschiedlicher Materialien gegenüber Schimmelpilzen eingrenzen. Grundlage für die Isoplethenbestimmung ist der LIM 0 (LIM: Lowest Isopleth of Mould) der für verschiedenste Pilze auf Vollmedium bestimmt wurde und der generell die unterste Grenze für Schimmelpilzwachstum darstellt.

Mit dem verwendeten Messprinzip können Messdaten gewonnen werden, auf deren Basis materialspezifische Isoplethenbereiche abgeleitet werden. Diese geben „Bandbreiten“ einer potentiellen Anfälligkeit der untersuchten Baustoffoberflächen gegenüber Pilzwachstum im Vergleich wieder.

Je mehr Daten von unterschiedlichen Kombinationen von relativer Luftfeuchte und Temperatur gemessen werden, desto enger können die Isoplethenbereiche definiert werden, bis hin zu detaillierten Isolplethensystemen. Sobald eine ausreichende Datenbasis „Materialspezifische Isoplethen“ vorliegt, kann diese Grundlage für hygrothermische Berechnungen sein.

1.4.4 Potenzielle Schadenverursacher, Vorbelastung

Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen, je nach Verarbeitung, können mit einer natürlichen Hintergrundbelastung an Schimmelpilzsporen behaftet sein können. Solange diese Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen jedoch den üblichen erwartungsgemäßen Randbedingungen (insbesondere Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in der Einbausituation) ausgesetzt sind, ist davon auszugehen, dass keine das Schimmelpilzwachstum fördernden Bedingungen bestehen und eine ursprünglich vorhandene Keimzahl im Laufe der Zeit durch das sukzessive Absterben der Sporen (artspezifisch) abnimmt. Bei verschiedenen Herstellungs- und Verarbeitungsvorgängen (z. B. Erhitzung, Alkalisierung) ist vorstellbar, dass die Produkte tatsächlich sterilisiert werden. Darüber hinaus ist zur Beurteilung einer angenommenen Schadenssituation auch die Kenntnis der Ausgangkeimzahlen, bzw. deren Größenordnung und Qualität, notwendig. Schließlich sind viele Pilzarten oder deren Sporen, die am Feld die lebende Pflanze befallen können (Pflan-

zenparasiten) nicht in der Lage, bei den Verhältnissen wie sie am / im Gebäude herrschen zu wachsen.

Bisher sind in der Literatur kaum Daten zu Schimmelpilzbefall von Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen verfügbar. Für das Feld werden, z. B. für Hanf 88 Pilzarten als potentielle Pathogene genannt [16], [17]. Von verschiedenen Autoren wird in diesem Zusammenhang besonders der Grauschimmel (*Botrytis cinerea*) als potentielle Ursache für massive Ernteausfälle bei Hanf genannt [16], [17], [18]. Allerdings ist bekannt, dass es nach der Ernte von Faserhanf zu Verlusten bis zu 9 % durch Insektenfraß und mikrobiologischen Abbau kommen kann [19]. Es werden aber keine Mikroorganismen (Schimmelpilze) benannt.

Schließlich werden auch Die im Rahmen des Projektes getesteten Materialien werden stichprobenartig auf ihre Ausgangskeimzahl hin untersucht und taxonomisch ausgewertet.

1.4.5 Ergebnisse

Bewuchsverlauf

Die Diagramme (Bild 8, Bild 9, Bild 10, Bild 11, Bild 12 und Bild 13) im Anhang zeigen den Bewuchsverlauf auf verschiedenen Materialien bei zwei ausgewählten Klimaten (25 °C, 95 %, r. H.; 10 °C, 95 % r. H.). Diese Bedingungen wurden für die Darstellung ausgewählt, weil sie die extremsten Klimate darstellen mit den für Schimmelpilzwachstum günstigsten Verhältnissen. Sehr frühen und schnellen Bewuchs zeigen unter den vorliegenden Bedingungen die Holzfaserplatte, die Roggenschüttung B, das Stroh und die Hanfwolle. Sehr geringen Bewuchs zeigen die Hanfmatte und das konventionelle Vergleichsmaterial Polystyrol.

Die verschiedenen Materialien weisen unterschiedliche Zeitpunkte auf, an denen Bewuchs sichtbar wird. Diese Zeitpunkte liegen selbst unter extremsten Bedingungen innerhalb eines Zeitraumes der bis zu fünf Wochen dauern kann. Das macht deutlich, wie wichtig es ist eine ausreichend lange Versuchsdauer festzusetzen.

Insgesamt zeigt sich, dass bei der höheren Temperatur (25 °C) das Wachstum innerhalb relativ kurzer Zeit nach der Aufimpfung beginnen kann, während bei der niedrigeren Temperatur (10 °C) der Beginn des Wachstums vergleichsweise mehrere Wochen nach hinten verschoben ist.

Auch bei der Bewuchsstärke zeigen sich bei der hohen und der niedrigen Temperatur Unterschiede. Die Bewuchsstärke ist bei der Flachsmatte, bei der Celluloseschüttung unbehandelt, bei der Holzfaserplatte mit Brandschutzausrüstung und bei der Schafswollmatte bei 10 °C deutlich niedriger als bei 25 °C.

Die höchsten Bewuchsklassen treten bei den hohen Luftfeuchtigkeiten auf. Für die Ermittlung der Isoplethenbereiche wurden ausschließlich Bewuchsklassen berücksichtigt, die größer oder gleich 3 sind, weil bei niedrigeren Bewuchsklassen nicht auszuschließen ist, dass evtl. abgestorbene Pilzsporen den auskeimenden Schimmelpilzen als Nahrungsgrundlage dienen und so ein gewisses Mycelwachstum möglich ist.

Bild 38 bis Bild 50 im Anhang zeigen die Oberflächen der Prüfkörper aus den verschiedenen Dämmmaterialien während des Versuchsverlaufs. Im Falle von Aufwuchs ist deutliches Schimmelwachstum sichtbar.

Isoplethenbereiche

Die Isoplethenbereiche der geprüften Materialien sind im Anhang in Bild 16 bis Bild 36 dargestellt. Die Grenzisoplethe für das jeweilige Material liegt im schraffierten Bereich. Oberhalb des schraffierten Bereiches kann Pilzwachstum beobachtet werden, unterhalb des schraffierten Bereiches kann kein Pilzwachstum beobachtet werden.

Die in dieser Messung untersuchten Materialien lassen sich bezüglich ihrer Schadenstoleranz in drei Gruppen einteilen, eine Gruppe mit hoher, eine mit mittlerer und eine mit geringer Schadenstoleranz. Diese Schadenstoleranzbereiche können mit den Substratgruppen I, II und III des Isoplethenmodells in Einklang gebracht werden [20], [21]. Eine hohe Schadenstoleranz entspricht dabei der Substratklasse III, der inerten Substrate. Die mittlere Schadenstoleranz entspricht der Substratgruppe II, der biologisch kaum verwertbaren Substrate und die die niedrige Schadenstoleranz entspricht der Substratgruppe I, den biologisch gut verwertbaren Substraten.

In die Gruppe mit geringer Schadenstoleranz fallen die Holzfaserplatte, das Stroh, der Stroh-Lehmputz-Verbund und die Hanfwolle. Die Grenzisoplethen dieser Materialien liegen nahe dem LIM 0, das heißt, sie neigen schon bei relativ niedrigen Luftfeuchten dazu von Schimmelpilzen bewachsen zu werden.

Es bleibt zu klären, warum der Hanf mit Wirkstoffausrüstung (kein Produkt eines Projektpartners) in diese Gruppe fällt.

In die Gruppe mit mittlerer Schadenstoleranz fallen die Holz- und Maisfaserplatte, die Holzfasern mit Brandschutzausrüstung und die beiden Roggenschüttungen.

In die Gruppe mit hoher Schadenstoleranz fallen die Hanfmatte, die Flachsmatte, die Schafswollematte und die Celluloseprodukte (die behandelte und unbehandelte Schüttung und die Platte). Die Grenzisoplethen dieser Materialien liegen in einem Bereich, der mit dem konventioneller Baustoffe vergleichbar ist.

Die Mineralischen Dämmplatten 1 und 2 zeigen eine hohe Schadenstoleranz, ihre Grenzisoplethen liegen im oberen Bereich. Ebenfalls im oberen Bereich liegt die Grenzisoplethe vom Anstrich mit Dämmfunktion 2. Der Anstrich mit Dämmfunktion 1 zeigt dagegen eine mittlere Schadenstoleranz, seine Grenzisoplethe liegt im mittleren Bereich.

Potentielle Schadenverursacher, Vorbelastung

Die Untersuchungen zur Hintergrundbelastung der geprüften Materialien ergeben, dass die meisten Produkte eine sehr geringe Ausgangskeimzahl, bis hin zur Keimfreiheit, aufweisen. Dies ist durch die Art der Verarbeitung der Ausgangsmaterialien bis zum fertigen Dämmstoff begründet, bei der es durch Verarbeitungsprozesse wie Erhitzen oder Zugabe von Binde- bzw. Ergänzungsstoffen zu einer starken Reduktion der Ausgangskeimzahl kommen kann. Lediglich bei dem Dämmstoff Stroh ist eine natürliche Hintergrundkeimzahl ausgeprägt, was dadurch bedingt ist, dass das Produkt direkt vom

Feld ohne weitere Verarbeitungsschritte verwendet wird. Die festgestellten Hintergrundkeimzahlen des Dämmstoffes Stroh sind jedoch nicht ungewöhnlich für das Material und für dessen Herkunft anzusehen.

1.4.6 Fazit

Für die untersuchten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wurden grundlegende Daten zu den Einsatzgrenzen der Materialien ermittelt, die eine Erhöhung der Produktsicherheit bedeuten.

In ihrer Eigenschaft gegenüber Schimmelpilzbewuchs liegen die im Projekt geprüften Produkte und Produktvarianten alle über dem LIM 0 (lowest isopleth of mold, bei optimaler Nährstoffversorgung).

Den drei Substratgruppen des Isoplethenmodells entsprechend lassen sich die untersuchten Materialien in 3 Schadenstoleranzklassen einteilen. Zur Gruppe der geringen Schadenstoleranz gehören die Holzfaserplatte, das Stroh, der Stroh-Lehmputz-Verbund, die Hanfwolle und der Hanf mit Wirkstoffausrüstung. Zur Gruppe der mittleren Schadenstoleranz gehören die Holz- und Maisfasern, die Holzfasern mit Brandschutzausrüstung und die Roggenschüttung A und B sowie der Anstrich mit Dämmfunktion 1. Zur Gruppe der hohen Schadenstoleranz gehören die Hanfmatte, die Flachsmatte, die Schafswollmatte, die behandelte und unbehandelte Celluloseschüttung, die Celluloseplatte, der Anstrich mit Dämmfunktion 2, die Mineralischen Dämmplatten 1 und 2, sowie die Mineralwolle und das Polystyrol.

Auf Grund der physikalischen Gegebenheiten herrschen an verschiedenen Stellen einer Konstruktion verschiedene Bedingungen bezüglich Raumtemperatur und Feuchtigkeit. Mit Hilfe der Isoplethenbereiche wird nun ein gezielter Einsatz des richtigen Materials am richtigen Ort einer Konstruktion möglich.

Das Isoplethenmodell ermöglicht einen direkten Vergleich der untersuchten Dämmstoffe mit anderen Produktgruppen und Produkten aus konventionellen Materialien. Dieser Vergleich zeigt, dass bestimmte Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im angewendeten Testverfahren genauso gut abschneiden wie Dämmstoffe aus konventionellen Materialien. Teilweise wurden überraschend hohe Resistenzen und Schadenstoleranzen festgestellt. Die erhobenen Daten zeigen die Eigenschaften der unterschiedlichen Produkte auf und verbessern den Erfolg bei Vermarktung und Vertrieb.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Untersuchung des Resistenzverhaltens und der Charakterisierung weiterer Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sowie das Verhalten in der realen Konstruktion.

1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den übergreifenden Untersuchungen an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wurden diese Baustoffe hinsichtlich ihrer chemischen, geruchlichen und mikrobiologischen Eigenschaften geprüft. Der geruchliche Eindruck der geprüften Produkte war unauffällig, was bei der Aufklärung der geruchsaktiven Stoffe bei den am intensivsten riechenden Dämmstoffen bestätigt werden konnte.

Die chemischen Emissionen bei Holzprodukten werden in erster Linie von der Essigsäure dominiert. Bei der geprüften Schafwolle herrschte 1,2-Dihydroxypropan vor; amioide Verbindungen konnten nur in geringen Konzentrationen nachgewiesen werden. Hanf-, Flachs- und Roggenprodukte zeichnen sich durch geringe Emissionen aus. Bei den Zelluloseprodukten ist das Emissionsbild stark vom verwendeten Ausgangsmaterial (bedrucktes vs. unbedrucktes Papier) und von der frei emittierenden Oberfläche und damit von Form des Dämmstoffs (Einblasdämmung vs. Dämmplatte) abhängig.

Die mikrobiologischen Untersuchungen zeigten, dass alle geprüften Dämmstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften gegenüber Schimmelpilzbewuchs über dem LIM 0 (lowest isopleth of mold, bei optimaler Nährstoffversorgung) liegen. Die untersuchten Produkte lassen sich in drei Schadenstoleranzklassen einteilen: Die Holzfaserplatte, das Stroh, der Stroh-Lehmputz-Verbund, die Hanfwolle und der Hanf mit Wirkstoffausrüstung weisen eine geringe Schadenstoleranz auf. Bauprodukte, die eine mittlere Schadenstoleranz zeigen, sind die Holz- und Maisfasern, die Holzfasern mit Brandschutzausrüstung und die Roggenschüttung A und B sowie der Anstrich mit Dämmfunktion 1. Eine hohe Schadenstoleranz weisen die Hanfmatte, die Flachsmatte, die Schafswollmatte, die behandelte und unbehandelte Celluloseschüttung, die Celluloseplatte, der Anstrich mit Dämmfunktion 2, die Mineralischen Dämmplatten 1 und 2, sowie die Mineralwolle und das Polystyrol auf. Da an unterschiedlichen Stellen einer Baukonstruktion unterschiedliche klimatische Verhältnisse herrschen, kann die Kenntnis der Schadenstoleranz der Dämmstoffe ein gezielter Einsatz gewährleistet werden.

Die Untersuchungen zeigten die Eigenschaften fabrikationsfrischer Baustoffe. Über das Langzeitverhalten sowohl hinsichtlich der mikrobiellen Stabilität als auch der chemischen und geruchlichen Eigenschaften liegen bislang keine Erfahrungen vor. Ebenso fehlen Erfahrungen über die Veränderungen dieser Eigenschaften im Schadensfall. Weiterhin bedürfen die Veränderungen der hygrothermischen Eigenschaften mit zunehmendem Alter und nach Schadensfällen genauerer Untersuchung. Zur Emissionsoptimierung hinsichtlich der Essigsäure können insbesondere bei holzbasierten Dämmstoffen Untersuchungen unter Berücksichtigung der Ernte- und Verarbeitungsbedingungen beitragen. Im Rahmen eines weiterführenden Verbundprojektes sollten diese o. g. Fragestellungen noch angegangen werden.

1.6 Literatur

[1] Zulassungsgrundsätze zur Gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen – Stand Juni 2004, DIBt Mitteilungen Nr. 4/2004.

[2] DIN EN ISO 16000-9: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 9: Bestimmung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen aus Bauprodukten und Einrichtungsgegenständen –Emissionsprüfkammer-Verfahren; Deutsche Fassung EN ISO 16000-9:2006.

[3] AgBB-Bewertungsschema: http://www.umweltbundesamt.de/bauprodukte/dokumente/AgBB-Bewertungsschema2005.pdf.

[4] DIN ISO 16000-6: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern; Probenahme auf TENAX TA, thermische Desorption und Gaschromatografie/MSD bzw. FID. Ausgabe Dezember 2004.

[5] DIN ISO 16000-3 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen; Probenahme mit einer Pumpe (ISO 16000-3:2001) Ausgabe August 2002.

[6] Brandhorst, J., Spritzendorfer, J., Gildhorn, K.: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2006).

[7] Ayerst, G.: The effect of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. Journal of Stored Products Research (1969), H. 5, S. 127-141.

[8] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart. (2001).

[9] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Tschaikner, A.; Krus, M.; Sedlbauer, K.; Schoch, T.: Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen - materialspezifische Wachstumsisoplethen. IBP-Mitteilung 457, 32 (2005), IRB Stuttgart.

[10] Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden – biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen und Gegenmaßnahmen. Bauphysik-Kalender 2003, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 435-531.

[11] Landesgesundheitsamt (LGA) Stuttgart: Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. http://www.landesgesundheitsamt.de/.

[12] Samson, R. A.; Hoekstra, E. S.; Frisvad, J. C.; Filtenborg, O.: Introduction to food- and airborne fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, 2002.

[13] Domsch, K.H.; Gams, W.; Anderson, T.-H.: Compendium of soil fungi. Reprint der Ausgabe von 1980. IHW-Verlag, Eching (1993), 293-295.

[14] Ellis, M. B. (1976): More Dematiaceous Hyphomycetes. C A B International Mycological Institute, Kew, Surrey.

[15] Paulus, W. (1993): Microbicides For The Protection of Materials, a Handbook. Chapman and Hall Publ., 1993.

[16] Bowyer, J. 2001: Industrial hemp (Cannabis sativa L.) as a papermaking raw material in Minnesota: technical, economic, and environmental considerations. Department of Wood and Paper Science Report Series – 2001, 50 pp. (http://www.cnr.umn.edu/BP/publications/hemp.pdf).

[17] MacPartland, J.M. 1999: A survey of hemp diseases and pests. In: Ranalli, P. (ed.): Advances in Hemp Research. New York: Food Products Press, pp. 109-131.

[18] VAN DER WERF H M G, E W J M MATHIJSSEN & A J HAVERKORT, 1996. The potential of hemp (Cannabis sativa L.) for sustainable fibre production, a crop physiological appraisal. Annals of Applied Biology: 129: 109-123.

[19] Pimentel, D., McLaughlin, L, Zepp, A., Lakitan, B., Kraus, T., Kleinman, P., Vancini, F., Roach, W., Grapp, E., Keeton, W., and Selig, G. 1991. Environmental and economic impacts of reducing U.S. agricultural pesticide use. In: CRC Handbook of Pest Management in Agriculture, Vol. I (2nd ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press, pp. 679-686.

[20] Sedlbauer, K.; Gabrio, T.; Krus, M.: Schimmelpilze – Gesundheitsgefährdung und Vorhersage. Sonderdruck aus „gi – Gesundheitsingenieur“ 123 (2002), H. 6, S. 285-295.

[21] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelbildung auf und in Bauteilen. Sonderdruck aus BAUPHYSIK 24 (2002), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, H. 3, S. 167-176.

1.7 Anhang 1: Tabellen

Tabelle 1: Emissionsuntersuchungen: Bauprodukte für die Untersuchungen.

Tabelle 2: Errechnete, flächenspezifische Lüftungsraten für unterschiedliche Einbauszenarien.

Tabelle 3: Im Prüfkammerexperiment verwendete flächenspezifische Lüftungsraten für unterschiedliche Baumaterialien.

Tabelle 4: Versuchsbedingungen bei den Prüfkammerexperimenten.

Tabelle 5: Emissionsuntersuchungen: Angewandte Probenahme- und Analysenverfahren.

Tabelle 6: Bewertungskriterien gemäß AgBB-Schema [3]

Tabelle 7: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblasdämmstoff F1.

Tabelle 8: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblasdämmstoff Q1.

Tabelle 9: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblasdämmstoff Q2.

Tabelle 10: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblasdämmstoff Q3.

Tabelle 11: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Platte M.

Tabelle 12: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Flachs-Platte G.

Tabelle 13: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Flachs-Platte K.

Tabelle 14: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Hanf-Matte AF.

Tabelle 15: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Hanf-Wolle L.

Tabelle 16: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M1.

Tabelle 17: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M2.

Tabelle 18: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M3.

Tabelle 19: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Roggengranulat W1.

Tabelle 20: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Roggengranulat W2.

Tabelle 21: Zur Geruchsaufklärung herangezogene Dämmstoffe

Tabelle 22: Geruchliche Untersuchungen: Dämmmatten aus Hanffasern.

Tabelle 23: Geruchliche Untersuchungen: Dämmplatten aus Holzfasern.

Tabelle 24: Geruchliche Untersuchungen: Schüttdämmung aus Roggengranulat.

Tabelle 25: Wichtigste Geruchsstoffe von trockener und feuchter Schafwolle

Tabelle 27: Biologische Untersuchungen: Verwendete Prüfpilze.

Tabelle 28: Übersicht der mikrobiologisch untersuchten Dämmstoffvarianten

Tabelle 1: Emissionsuntersuchungen: Bauprodukte für die Untersuchungen.

	Rohstoff	Produktart	Anonymisierte Produktbezeichnung
1	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff F1
2	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff Q1
3	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff Q2
4	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff Q3
5	Cellulose	Platte	Cellulose-Platte M
6	Flachs	Platte	Flachs-Platte G
7	Flachs	Platte	Flachs-Platte K
8	Hanf	Matte	Hanf-Matte AF
9	Hanf	Stopfwolle	Hanf-Wolle L
10	Holz	Faserplatte	Holzfaser-Platte M1
11	Holz	Faserplatte	Holzfaser-Platte M2
12	Holz	Faserplatte	Holzfaser-Platte M3
13	Roggen	Granulat	Roggengranulat W1
14	Roggen	Granulat	Roggengranulat W2
15	Schafwolle	Matte	Schafwoll-Matte E

Tabelle 2: Errechnete, flächenspezifische Lüftungsraten für unterschiedliche Einbauszenarien.

Einbauszenarium ($V_{Modellraum}$ = 32,4 m³)	Verbaute Fläche [m²]	q [m³/(m² · h)]
Boden	2	1,25 [1)]
Decke	12	1,25 [2)]
Boden und Decke	24	0,68
Alle Wandflächen	37,8	0,43
Alle Wandflächen + Decke	49,8	0,33
Sämtliche Flächen	61,8	0,26

1) Festlegung lt. Zulassungsgrundsätzen [1], rechnerischer Wert 1,35.

2) In Anlehnung an die Festlegung lt. Zulassungsgrundsätzen [1]

Tabelle 3: Im Prüfkammerexperiment verwendete flächenspezifische Lüftungsraten für unterschiedliche Baumaterialien.

Produkt	Flächenspezifische Lüftungsrate [m³/m² · h]
Einblasdämmstoff aus Cellulose	0,68
Dämmplatte aus Cellulosefasern	0,43
Dämmmatten aus Flachsfasern	0,43
Dämmmatte aus Hanffasern	0,43
Stopfwolle aus Hanf	0,33
Dämmplatten aus Holzfasern	0,43
Schüttung aus Roggengranulat	0,68
Dämmmatte aus Schafwolle	0,43

Tabelle 4: Versuchsbedingungen bei den Prüfkammerexperimenten.

Parameter	Erläuterung	Wert
Systemblindwerte der Prüfkammer	Einzelsubstanz $>$ 2 µg/Nm³ [Anzahl]	0
	TVOC-Wert C_6 bis C_{16} [µg/Nm³]	< 10
Temperatur	äquilibrierte Prüfkammer [°C]	23,0
	während der Prüfung [°C]	23 $\pm$ 1
Relative Luftfeuchte	äquilibrierte Prüfkammer [%]	50
	während der Prüfung [%]	50 $\pm$ 5
Reinluftsystem	über Aktivkohle und Partikelfilter aufgereinigte Pressluft	

Tabelle 5: Emissionsuntersuchungen: Angewandte Probenahme- und Analysenverfahren.

Stoffgruppe	Probenahmezeitpunkt [d] [1]	Proben-volumen [NL]	Adsorbens	Analyseverfahren
VOC & SVOC	72 h, 28 d	2 und 5	Adsorptionsröhrchen nach Anforderung 'TENAX TA®'	Thermodesorption, GC-MS/FID [2]
Aldehyde & Ketone	72 h, 28 d	60	DNPH-Kartusche (Fa. Waters)	HPLC-DAD [3]
Flüchtige Amine	72 h, 28 d	50	mit Säure imprägnierte Glaswolle	HPLC-MS/MS [4]

1) Zeitpunkt nach Einbringen des Prüfkörpers in die Prüfkammer.

2) Qualitative Analyse über GC-MS, quantitative Analyse mittels GC-FID nach ISO 16000-6 [4], Kalibrierung über Flüssigdotierung der Standards auf Tenax TA®.

3) Untersuchung auf die DNP-Hydrazone folgender Verbindungen: Formaldehyd, Acetaldehyd, Aceton, Acrolein, Propionaldehyd, Hexanal, Crotonaldehyd, 2-Butanon, Butyraldehyd, Benzaldehyd, 3-Methyl-butyraldehyd,2,5-Dimethylbenzaldehyd, o-Tolualdehyd, m-Tolualdehyd, p-Tolualdehyd und Dimethylbenzaldehyd nach ISO 16000-3 [5]. Die Quantifizierung erfolgt substanzspezifisch über Fünf-Punkt-Kalibrierfunktionen der DNP-Hydrazone in Acetonitril.

4) Untersuchung auf flüchtige Amine, Aminoalkohole und N-Heterozyklen: reaktive Probenahme auf mit Säure imprägnierter Glaswolle, Elution der quarternären Ammoniumsalze. Die Identifizierung und Quantifizierung erfolgt über die Precursor-Produktionen-Übergänge mit substanzspezifischer Kalibration.

Tabelle 6: Bewertungskriterien gemäß AgBB-Schema [3]

Parameter	3 d	28 d
TVOC (C_6 – C_{16}) [1]	$\leq$ 10 mg/m³	≤ 1,0 mg/m³
Summe SVOC (C_{16} – C_{22}) [2]	-- [3]	≤ 0,1 mg/m³
R [4]	-- [3]	≤ 1
Summe $VOC_{o.\ NIK}$ [5]	-- [3]	$\leq$ 0,1 mg/m³
Summe Cancerogene [6]	$\leq$ 0,01 mg/m³	$\leq$ 0,001 mg/m³

1) TVOC: Summe aller Einzelstoffe ≥ 5 µg/m³ im Retentionsbereich C6 – C16

2) Summe aller Einzelstoffe ≥ 5 µg/m³ im Retentionsbereich > C16 – C22

3) Keine Festlegung getroffen

4) R = Summe aller Ri = Summe aller Quotienten (Ci / NIKi)

5) Summe der nicht bewertbaren Einzelstoffe ≥ 5 µg/m³ im Retentionsbereich C6 – C16

6) Gemäß EU-Kategorie 1 und 2 (EU-Richtlinie 67/548/EWG)

Tabelle 7: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblas-dämmstoff F1.

Probe	**E686**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK** [1] **[µg/m³]**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a]	50-00-0	46	---	16	--- [2]
Aceton [a]	67-64-1	2	---	< BG [3]	--- [2]
Propanal [a]	123-38-6	3	---	< BG [3]	--- [2]
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure [b]	64-19-7	556	---	168	500
Methylisobutylketon [a]	108-10-1	7	---	2	830
Hexanal [a]	66-25-1	9	---	6	890
n-Tridecan [b]	629-50-5	7	---	3	21000
nicht auftrennbarer Cluster bis einschl. n-C_{16} [d]	--- [4]	2148	---	684	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht auftrennbarer Cluster > n-C_{16} – n-C_{22} [d]	--- [4]	1571	---	930	--- [2]
evtl. Palmitinsäure [c]	57-10-3	2	---	2	--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**2727**	---	**858**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**1571**	---	**930**	
R		**1,130**	---	**0,343**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**2148**	---	**684**	
Σ Cancerogene		**0**	---	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**46**	---	**16**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 8: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblas-dämmstoff Q1.

Probe	**E1076-1**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] 1)**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd a)	50-00-0	45	38	19	--- 2)
Acetaldehyd a)	75-07-0	5	2	< BG 3)	--- 2)
Aceton a)	67-64-1	37	6	< BG 3)	--- 2)
Propanal a)	123-38-6	8	3	1	--- 2)
Acrolein a)	107-02-8	1	1	1	--- 2)
Butanal a)	123-72-8	5	3	< BG 3)	640
Ameisensäure c)	64-18-6	11	4	< BG 3)	--- 2)
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure b)	64-19-7	310	371	84	500
Ethylmethylketon a)	78-93-3	5	3	< BG 3)	3000
2-Methoxyethanol b)	109-86-4	11	9	1	15
Pentanal a)	110-62-3	31	22	8	1700
Isovaleraldehyd a)	590-86-3	< BG 3)	3	< BG 3)	--- 2)
1-Pentanol b)	71-41-0	25	18	5	3600
Buttersäure b)	107-92-6	4	4	1	370
Hexanal a)	66-25-1	366	250	73	890
evtl. 4-Methylhexanal c)	41062-97-8	2	2	1	--- 2)
n-Valeriansäure a)	109-52-4	8	7	4	420
2-Heptanon b)	110-43-0	5	5	1	--- 2)
Heptanal b)	111-71-7	4	3	1	1000
nicht näher identifizierter Aldehyd d)	--- 4)	5	4	1	--- 2)
Benzaldehyd a)	100-52-7	3	3	< BG 3)	90
m/p-Tolualdehyd a)	--- 4)	2	2	< BG 3)	--- 2)
n-Capronsäure b)	142-62-1	89	71	51	490
Octanal b)	124-130	3	2	< BG 3)	1100
evtl. Octenon d)	1669-44-9	3	2	1	--- 2)
nicht näher identifiziertes C8-Cycloalkan d)	--- 4)	4	3	2	--- 2)
2-Octenal b)	2363-89-5	20	15	6	18
evtl. Methylisothiazol c)	693-97-0	3	3	1	--- 2)
evtl. Octadiendiol c)	4486-59-3	1	1	1	--- 2)
Nonanal b)	124-19-6	10	6	1	1300

Probe	E1076-1	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
Benzoesäure [c]	65-85-0	6	3	8	--- [2]
n-Dodecan [b]	112-40-3	5	< BG [3]	< BG [3]	21000
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	3	3	1	--- [2]
nicht näher identifiziertes Alken [d]	--- [4]	1	3	< BG [3]	--- [2]
n-Tridecan	629-50-5	2	< BG [3]	< BG [3]	21000
nicht auftrennbarer Cluster bis n-Hexadecan [d]	--- [4]	170	74	10	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht auftrennbarer Cluster > Hexadecan bis 42,3' [d]	--- [4]	121	91	38	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	1	1	1	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	1	1	1	--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**731**	**671**	**245**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**121**	**91**	**38**	
R		**2,735**	**2,442**	**0,693**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**186**	**79**	**18**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**101**	**44**	**19**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 9: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblas-dämmstoff Q2.

Probe	E1076-2	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a]	50-00-0	36	30	12	--- [2]
Acetaldehyd [a]	75-07-0	< BG [3]	1	< BG [3]	--- [2]
Aceton [a]	67-64-1	2	3	3	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	2	< BG [3]	3	--- [2]

Probe	E1076-2	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	CAS-Nr.	3 d	7 d	28 d	
Acrolein [a]	107-02-8	< BG [3]	1	< BG [3]	--- [2]
Butanal [a]	123-72-8	1	1	1	640
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure [b]	64-19-7	217	255	177	500
Ethylmethylketon [a]	78-93-3	6	1	< BG [3]	3000
1-Butanol [b]	71-36-3	14	7	2	3100
Pentanal [a]	110-62-3	8	5	2	1700
1,2-Dihydroxypropan [b]	57-55-6	33	47	40	320
Isobuttersäure [b]	79-31-2	7	7	4	370
1-Pentanol [b]	71-41-0	77	44	13	3600
nicht näher identifizierte C6-Alkohol [d]	--- [4]	2	1	1	--- [2]
Hexanal [a]	6-25-1	48	32	13	890
1-Hexanol [b]	111-27-3	4	2	< BG [3]	4200
n-Valeriansäure [b]	109-52-4	7	13	5	420
2-Heptanon [c]	110-43-0	2	1	1	--- [2]
Heptanal [b]	111-71-7	8	5	4	1000
Ethylenglykolmonobutylether [b]	111-76-2	6	5	3	980
2-Heptenal [b]	2463-63-0	8	5	2	16
Benzaldehyd [a]	100-52-7	6	5	< BG [3]	90
evtl. Heptylformiat [c]	112-23-2	6	4	2	--- [2]
n-Capronsäure [b]	142-62-1	41	96	39	490
Octanal [b]	124-13-0	8	5	3	1100
evtl. Azoisobuttersäurenitril [c]	78-67-1	< BG [3]	1	2	--- [2]
Salicylaldehyd [c]	90-02-8	2	1	1	--- [2]
2-Octenal [b]	2363-89-5	12	8	4	18
evtl. Methylisothiazol [c]	693-97-0	2	3	2	--- [2]
Acetophenon [b]	98-86-2	9	9	4	490
Nonanal [b]	124-19-6	2	1	1	1300
2-Ethylhexansäure [b]	149-57-5	17	8	4	50
Naphthalin + unbekannter Stoff [d]	--- [4]	2	2	2	--- [2]
n-Dodecan [b]	112-40-3	4	4	3	21000
Decanal [b]	112-31-2	17	3	1	1400
2-Decenal [b]	3913-71-1	6	1	3	22
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	4	4	2	--- [2]

Probe	E1076-2	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
n-Tridecan [b]	629-50-5	2	1	2	21000
nicht auftrennbarer Cluster bis n-Hexadecan [d]	--- [4]	9	4	2	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht auftrennbarer Cluster > Hexadecan bis 44,1' [d]	--- [4]	2921	2255	1107	--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**613**	**518**	**287**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**2921**	**2255**	**1107**	
R		**2,718**	**1,886**	**0,590**	
Σ VOC $_{ohne\ NIK}$		**20**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**36**	**30**	**12**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 10: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Einblas-dämmstoff Q3.

Probe	**E1076-3**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³]** [1)]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a)]	50-00-0	44	34	18	--- [2)]
Acetaldehyd [a)]	75-07-0	12	6	2	--- [2)]
Aceton [a)]	67-64-1	49	13	1	--- [2)]
Propanal [a)]	123-38-6	27	11	2	--- [2)]
Acrolein [a)]	107-02-8	1	1	1	--- [2)]
Butanal [a)]	123-72-8	11	6		640
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure [b)]	64-19-7	648	529	77	500
Isovaleraldehyd [a)]	590-86-3	6	3	< BG [3)]	--- [2)]
Ethylmethylketon [a)]	78-93-3	10	6	< BG [3)]	3000
2-Methyl-propanol [b)]	78-83-1	15	12	2	3100
2-Pentanon	107-87-9	1	2	< BG [3)]	--- [2)]
Pentanal [a)]	110-62-3	61	39	11	1700
1,2-Dihydroxypropan [b)]	57-55-6	33	27	12	320
Evtl. 2-Methylbutanal [c)]	107-86-8	2	2	< BG [3)]	--- [2)]
Isobuttersäure [b)]	79-31-2	10	5	2	370
1-Pentanol [b)]	71-41-0	45	36	7	3600
nicht näher identifizierte Carbonsäure [d)]	--- [4)]	3	1	1	--- [2)]
Hexanal [a)]	66-25-1	31	24	64	890
2-Heptanon	110-43-0	16	3	2	--- [2)]
Heptanal [b)]	111-71-7	10	6	2	1000
Ethylenglykolmonobutylether [b)]	111-76-2	147	146	72	980
2-Heptenal [b)]	2463-63-0	14	11	2	16
Benzaldehyd [a)]	100-52-7	4	3	1	90
m/p-Tolualdehyd [a)]	--- [4)]	4	3	< BG [3)]	--- [2)]
1-Heptanol [b)]	112-23-2	5	4	1	3100
n-Capronsäure [b)]	142-62-1	304	136	51	490
Octanal [b)]	124-13-0	17	8	2	1100
3-Octeneon [c)]	1669-44-9	3	2	< BG [3)]	--- [2)]
Salicylaldehyd [c)]	90-02-8	3	2	1	--- [2)]

Probe	E1076-3	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
2-Octenal [b]	2363-89-5	27	20	5	18
evtl. Propenylhexanoat [c]	123-68-2	7	6	2	--- [2]
Nicht näher identifiziertes Keton [d]	--- [4]	8	5	1	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	3	1	< BG [3]	--- [2]
nicht näher identifizierter Alkohol [d]	--- [4]	3	2	< BG [3]	--- [2]
n-Undecan [b]	1120-21-4	3	< BG [3]	< BG [3]	21000
Nonanal [b]	124-19-6	21	14	< BG [3]	1300
nicht näher identifiziertes C12-Alkan [d]	--- [4]	2	< BG [3]	2	--- [2]
nicht näher identifiziertes C12-Alkan [d]	--- [4]	2	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
nicht näher identifiziertes C12-Alkan [d]	--- [4]	2	1	< BG [3]	--- [2]
Naphthalin [b]	91-20-3	2	1	< BG [3]	50
nicht näher identifiziertes C12-Alken [d]	--- [4]	2	1	< BG [3]	--- [2]
n-Dodecan [b]	112-40-3	40	11	< BG [3]	21000
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	4	1	< BG [3]	--- [2]
evtl. Nonadienal [c]	6750-03-4	2	1	< BG [3]	--- [2]
4-Isopropylbenzaldehyd [c]	122-03-2	3	2	< BG [3]	--- [2]
evtl. Hexylcyclohexan [c]	4292-75-5	3	1	< BG [3]	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	6	5	1	--- [2]
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	3	2	1	--- [2]
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	3	1	< BG [3]	--- [2]
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	4	2	< BG [3]	--- [2]
2-Decenal	3913-71-1	15	9	2	22
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	6	3	< BG [3]	--- [2]
nicht näher identifiziertes C13-Alkan [d]	--- [4]	12	6	1	--- [2]
nicht näher identifiziertes Cycloalkan [d]	--- [4]	5	3	< BG [3]	--- [2]
n-Tridecan [b]	629-50-5	58	33	2	21000
nicht auftrennbarer Cluster bis n-Hexadecan [d]	--- [4]	9928	9045	4081	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht auftrennbarer Cluster > Hexadecan bis 44,1' [d]	--- [4]	3936	4305	3197	--- [2]

Probe	E1076-3	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] 1)
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**11505**	**10139**	**4380**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**3936**	**4305**	**3197**	
R		**5,393**	**3,884**	**0,727**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**9994**	**9067**	**4081**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**143**	**70**	**18**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 11: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Cellulose-Platte M.

Probe	**E759**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³]** [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a]	50-00-0	31	9	14	--- [2]
Acetaldehyd [a]	75-07-0	13	1	< BG [3]	--- [2]
Propanal [a]	123-38-6	13	2	2	--- [2]
Aceton [a]	67-64-1	38	5	13	--- [2]
Butanal [a]	123-72-8	2	< BG [3]	< BG [3]	640
VOC (C_6 – C_{16})					
2-Butenal [a]	4170-30-3	4	1	1	1
Essigsäure [b]	64-19-7	227	81	71	500
1-Methoxypropanol-2 [b]	107-98-2	190	< BG [3]	19	3700
Pentanal [a]	110-62-3	15	1	2	1700
evtl. Hexadienal [c]	142-83-6	2	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Propionsäure [b]	79-09-4	5	< BG [3]	< BG [3]	310
1,4-Dioxan	123-91-1	2	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Methylisobutylketon [a]	108-10-1	4	< BG [3]	< BG [3]	830
Toluol [b]	108-88-3	2	< BG [3]	< BG [3]	1900
Hexanal [a]	66-25-1	59	8	11	890
Cyclohexanon [a]	108-94-1	12	< BG [3]	< BG [3]	400
Hexamethylcyclotrisiloxan [c]	541-05-9	4	< BG [3]	1	--- [2]
Furfural [b]	98-01-1	8	< BG [3]	< BG [3]	20
Heptanal [b]	111-71-7	3	< BG [3]	< BG [3]	1000
nicht näher identifizierter Ester der Essigsäure [d]	--- [4]	3	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
unbekannter Stoff [d]	--- [4]	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Benzaldehyd [a]	100-52-7	3	< BG [3]	< BG [3]	90
n-Capronsäure [b]	142-62-1	4	1	< BG [3]	490
Phenol [b]	108-95-1	1	< BG [3]	< BG [3]	78
Octamethylcyclotetrasiloxan [b]	556-67-2	3	< BG [3]	1	1200
Octanal [b]	124-13-0	3	1	< BG [3]	1100
Azoisobuttersäurenitril [c]	78-67-1	2	1	< BG [3]	--- [2]
2-Octenal [b]	2363-89-5	6	< BG [3]	< BG [3]	18
Nonanal [b]	124-19-6	4	2	< BG [3]	1300
Benzoesäure [c]	65-85-0	1	1	< BG [3]	--- [2]

Probe	E759	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
evtl. Nonenal [c]	2277-19-2	3	1	< BG [3]	--- [2]
n-Dodecan [b]	112-40-3	1	< BG [3]	< BG [3]	21000
Decanal [b]	112-31-2	1	2	< BG [3]	1400
2,6-Di-tert-butyl-p-chinon [c]	719-22-2	1	1	< BG [3]	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					

Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**522**	**89**	**101**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**1,359**	**0,171**	**0,159**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**0**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**95**	**9**	**46**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 12: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Flachs-Platte G.

Probe	**E719**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³]** [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Acetaldehyd [a]	75-07-0	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Acrolein [a]	107-02-8	2	1	1	--- [2]
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure [b]	64-19-7	132	132	31	500
Decanal [b]	112-31-2	2	2	< BG [3]	1400
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---					--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**132**	**132**	**31**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**0,264**	**0,264**	**0,062**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**0**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**0**	**0**	**0**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 13: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Flachs-Platte K.

Probe	**E1081**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] 1)**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Propanal a)	123-38-6	2	1	< BG 3)	--- 2)
Butanal a)	123-72-8	1	< BG 3)	< BG 3)	--- 2)
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure b)	64-19-7	128	100	12	500
Pentanal a)	110-62-3	1	1	< BG 3)	1700
Hexanal a)	66-25-1	6	3	2	890
n-Valeriansäure b)	109-52-4	2	1	< BG 3)	420
Butyrolacton b)	96-48-0	4	3	< BG 3)	2700
Benzaldehyd a)	100-52-7	2	< BG 3)	< BG 3)	90
n-Capronsäure b)	142-62-1	33	15	3	490
Nonanal b)	124-19-6	2	1	< BG 3)	1300
n-Dodecan b)	112-40-3	2	1	< BG 3)	21000
nicht auftrennbarer Cluster bis n-Hexadecan d)	--- 4)	217	169	47	--- 2)
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht auftrennbarer Cluster > Hexadecan bis 41,2' d)	--- 4)	62	52	28	--- 2)
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**384**	**284**	**59**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**62**	**52**	**28**	
R		**0,330**	**0,231**	**0,024**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**217**	**169**	**47**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**0**	**0**	**0**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 14: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Hanf-Matte AF.

Probe	**E762**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] [1)]**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a)]	50-00-0	50	6	< BG [3)]	--- [2)]
Acetaldehyd [a)]	75-07-0	39	16	8	--- [2)]
Propanal [a)]	123-38-6	3	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Aceton [a)]	67-64-1	30	3	11	--- [2)]
Butanal [a)]	123-72-8	6	1	< BG [3)]	640
Isobutyraldehyd [c)]	78-84-2	2	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Diacetyl	431-03-8	3	1	< BG [3)]	--- [2)]
VOC (C_6 – C_{16})					
2-Butenal [a)]	4170-30-3	2	1	< BG [3)]	1
Ethylmethylketon [a)]	78-93-3	3	< BG [3)]	< BG [3)]	3000
Essigsäure [b)]	64-19-7	13	20	< BG [3)]	500
3-Methylbutanal	590-86-3	2		< BG [3)]	
1-Hydroxyaceton [b)]	116-09-6	560	32	< BG [3)]	300
evtl. Dihydromethylfuran [c)]	1487-15-6	4	5	< BG [3)]	--- [2)]
Coelution von Pentanal und Heptan [d)]	--- [4)]	1	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
3-Hydroxy-2-butanon [c)]	513-86-0	9	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
evtl. Pyrrol [c)]	109-97-7	2	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Hydroxybutanon [c)]	5077-67-8	7	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
N,N-Dimethylformamid [c)]	68-12-2	3	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Hexanal [a)]	66-25-1	4	1	< BG [3)]	890
Cyclohexanon [a)]	108-94-1	2	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Hexamethylcyclotrisiloxan [c)]	541-05-9	3	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Furfural [b)]	98-01-1	7	1	< BG [3)]	20
Furfurylalkohol [c)]	98-00-0	37	1	< BG [3)]	--- [2)]
N,N-Dimethylacetamid [c)]	127-19-5	1	2	< BG [3)]	--- [2)]
Heptanal [b)]	111-71-7	2	< BG [3)]	< BG [3)]	1000
Butyrolacton [b)]	96-48-0	80	5	< BG [3)]	2700
Benzaldehyd [a)]	100-52-7	3	2	< BG [3)]	90
Phenol [b)]	108-95-1	4	2	< BG [3)]	78
Evtl. Tetrahydropyranon [c)]	542-28-9	1	< BG [3)]	< BG [3)]	--- [2)]
Acetophenon [b)]	98-86-2	1	1	< BG [3)]	490

Probe	**E762**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] 1)**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
Benzoesäure c)	65-85-0	1	1	< BG 3)	--- 2)
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
evtl. Trimethylpentadecanon c)	502-69-2	1	1	< BG 3)	--- 2)
bis-(2-ethylhexyl)-phthalat c)	117-81-7	1	< BG 3)	< BG 3)	--- 2)
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**719**	**62**	**0**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**2,280**	**0,149**	**0**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**53**	**5**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**125**	**22**	**19**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 15: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Hanf-Wolle L.

Probe	**E1060**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] 1)**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd a)	50-00-0	< BG 3)	5	< BG 3)	--- 2)
Acetaldehyd a)	75-07-0	16	5	2	--- 2)
Aceton a)	67-64-1	11	6	2	--- 2)
Propanal a)	123-38-6	17	7	2	--- 2)
Butanal a)	123-72-8	1	2	1	640
VOC (C_6 – C_{16})					
1-Butanol b)	71-36-3	2	2	2	3100
evtl. Penten-3-ol d)	616-25-1	2	1	1	--- 2)
Ethylmethylketon a)	78-93-3	2	2	< BG 3)	--- 2)
3-Methylbutanal c)	590-86-3	4	3	1	--- 2)
Pentanal a)	110-62-3	4	2	1	1700
Toluol b)	108-88-3	6	4	1	1900
Hexanal a)	66-25-1	23	8	4	890
Cyclohexanon b)	108-94-1	1	< BG 3)	< BG 3)	400
1-Hexanol b)	111-27-3	6	3	< BG 3)	4200
Heptanal b)	111-71-7	2	1	1	1000
a-Pinen b)	80-56-8	2	1	1	1400
evtl. Heptylformiat c)	112-23-2	1	1	< BG 3)	--- 2)
Limonen b)	138-86-3	2	1	< BG 3)	1400
evtl. Eucalyptol c)	470-82-6	1	1	< BG 3)	--- 2)
evtl. 3-Octen-2-on c)	1669-44-4	2	1	< BG 3)	--- 2)
evtl. 3,5-Octadien-2-on c)	38284-27-4	5	2	< BG 3)	--- 2)
evtl. 3,5-Octadien-2-on c)	38284-27-4	4	< BG 3)	< BG 3)	--- 2)
unbekannter Stoff d)	--- 4)	4	2	1	--- 2)
n-Dodecan b)	112-40-3	3	1	1	21000
unbekannter Stoff d)	--- 4)	1	1	< BG 3)	--- 2)
evtl. 6-Methylheptadiensäure-ethylester c)	10236-06-3	1	1	< BG 3)	--- 2)
n-Tridecan b)	629-50-5	1	< BG 3)	2	21000
evtl. Butyloctenal c)	13019-16-4	8	7	1	--- 2)
n-Tetradecan b)	629-59-4	4	2	2	21000
Caryophyllen b)	87-44-5	2	1	1	1400

Probe	E1060	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3 d**	**7 d**	**28 d**	
evtl. Alloaromadendren [c]	25246-27-9	1	1	1	--- [2]
Hexahydrodimethyl-methylethyl-naphthalin [c]	473-14-3	1	< BG [3]	1	--- [2]
evtl. Caryophyllenoxid [c]	1139-30-6	2	1	1	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---	---				--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**48**	**15**	**0**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**0,030**	**0,009**	**0**	
Σ VOC $_{ohne\ NIK}$		**13**	**7**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**44**	**13**	**0**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 16: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M1.

Probe	E758	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
VVOC (< C_6)					
Acetaldehyd [a]	75-07-0	27	< BG [3]	11	--- [2]
Propanal [a]	123-38-6	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Acrolein [a]	107-02-8	< BG [3]	< BG [3]	12	--- [2]
Aceton [a]	67-64-1	18	< BG [3]	10	--- [2]
VOC (C_6 – C_{16})					
2-Butenal [a]	4170-30-3	1	< BG [3]	< BG [3]	1
evtl. C7-Cycloalkin [d]	--- [4]	4	< BG [3]	2	--- [2]
Essigsäure [b]	64-19-7	2090	243	346	500
Pentanal [a]	110-62-3	3	< BG [3]	< BG [3]	1700

Probe	E758	Kammerkonzentration in [µg/m³]			NIK [µg/m³] [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
Propionsäure [b]	79-09-4	42	< BG [3]	7	310
Methylisobutylketon [a]	108-10-1	5	3	3	830
Hexanal [a]	66-25-1	9	1	1	890
Hexamethylcyclotrisiloxan [c]	541-05-9	4	< BG [3]	2	--- [2]
Furfural [b]	98-01-1	21	< BG [3]	2	20
Heptanal [b]	111-71-7	1	< BG [3]	< BG [3]	1000
Butyrolacton [b]	96-48-0	1	< BG [3]	< BG [3]	2700
Benzaldehyd [a]	100-52-7	1	< BG [3]	< BG [3]	90
n-Capronsäure [b]	142-62-1	1	< BG [3]	< BG [3]	490
Octamethylcyclotetrasiloxan [b]	556-67-2	1	< BG [3]	< BG [3]	1200
Octanal [b]	124-13-0	1	< BG [3]	< BG [3]	1100
n-Dodecan [b]	112,40-3	13	3	< BG [3]	21000
nicht näher identifiziertes C14-Alkan [d]	--- [4]	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
n-Tetradecan [b]	629-59-4	4	2	< BG [3]	21000
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---	---				--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**2180**	**243**	**353**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**5,382**	**0,486**	**0,715**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**0**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**45**	**0**	**33**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 17: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M2.

Probe	**E1001-4**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] [1)]**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a)]	50-00-0	< BG [3)]	4	< BG [3)]	--- [2)]
Unbekannter Stoff [d)]	--- [4)]	2	2	2	--- [2)]
Acetaldehyd [a)]	75-07-0	30	11	< BG [3)]	--- [2)]
Aceton [a)]	67-64-1	49	22	< BG [3)]	--- [2)]
Ameisensäure [c)]	64-18-6	4	4	2	--- [2)]
VOC (C_6 – C_{16})					
	64-19-7	1483	1652	1630	500
1-Hydroxyaceton [b)]	116-09-6	12	14	12	300
Propionsäure [b)]	79-09-4	4	4	4	310
Methylpyrazin [c)]	109-08-0	9	11	7	--- [2)]
Furfural [b)]	98-01-1	234	213	84	20
α-Pinen [b)]	80-56-8	1	< BG [3)]	< BG [3)]	1400
5-Methylfurfural [c)]	620-02-0	10	10	6	--- [2)]
evtl. Pyrrolcarboxaldehyd [d)]	1003-29-8	14	18	18	--- [2)]
Benzaldehyd [a)]	100-52-7	5	5	1	90
2-Ethylhexansäure [b)]	149-57-5	1	1	< BG [3)]	50
Benzoesäure [c)]	65-85-0	1	4	1	--- [2)]
n-Dodecan [b)]	112-40-3	2	1	< BG [3)]	21000
evtl. Glykolether [d)]	--- [4)]	1	< BG [3)]	1	--- [2)]
evtl. Glykolether [d)]	--- [4)]	2	1	< BG [3)]	--- [2)]
n-Tetradecan [b)]	629-59-4	1	1	< BG [3)]	21000
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---	---				--- [2)]

Auswertung				
TVOC (C_6 – C_{16})	**1767**	**1923**	**1757**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})	**0**	**0**	**0**	
R	**14,762**	**14,057**	**7,5**	
Σ VOC $_{ohne\ NIK}$	**33**	**39**	**31**	
Σ Cancerogene	**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)	**79**	**33**	**0**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 18: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Holzfaser-Platte M3.

Probe	**E1001-5**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³]** [1)]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
VVOC (< C_6)					
Formaldehyd [a)]	50-00-0	< BG [3)]	1	< BG [3)]	--- [2)]
unbekannter Stoff [d)]	--- [4)]	2	1	< BG [3)]	--- [2)]
Acetaldehyd [a)]	75-07-0	7	42	11	--- [2)]
Aceton [a)]	67-64-1	< BG [3)]	9	< BG [3)]	--- [2)]
Propionaldehyd [a)]	123-38-6	1	3	1	--- [2)]
Acrolein [a)]	107-02-8	< BG [3)]	2	2	--- [2)]
Butanal [a)]	123-72-8	8	2	< BG [3)]	640
Ameisensäure [c)]	64-18-6	1	2	< BG [3)]	--- [2)]
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure [b)]	64-19-7	1424	1447	724	500
2-Butenal [a)]		< BG [3)]	6	1	1
Pentanal [a)]	110-62-3	12	9	4	1700
Propionsäure [b)]	79-09-4	8	25	10	310
evtl. Pyrazin [c)]	290-37-9	1	1	< BG [3)]	--- [2)]
Acetamid [c)]	60-35-5	1	2	1	--- [2)]
Hexanal [a)]	66-25-1	17	2	9	890
Hexamethylcyclotrisiloxan [c)]	541-05-9	9	1	2	--- [2)]

Probe Substanz	E1001-5 CAS-Nr.	Kammerkonzentration in [µg/m³] 3d	 7d	 28d	NIK [µg/m³] [1]
Furfural [b]	98-01-1	49	31	15	20
n-Valeriansäure [b]	109-52-4	4	1	1	420
Butyrolacton [b]	96-48-0	2	7	5	2700
5-Methylfurfural [c]	620-02-0	1	1	1	--- [2]
n-Capronsäure [b]	142-62-1	21	6	2	490
evtl. Pyrrolcarboxaldehyd [c]	1003-29-8	2	3	3	--- [2]
Benzaldehyd [a]	100-52-7	1	< BG [3]	< BG [3]	90
Benzylalkohol [b]	100-51-6	2	< BG [3]	2	440
nicht näher identifizierter Glykolether [d]	--- [4]	2	< BG [3]	1	--- [2]
nicht näher identifizierter Glykolether [d]	--- [4]	2	< BG [3]	1	--- [2]
2-Ethylhexansäure [b]	149-57-5	4	3	< BG [3]	50
Benzoesäure [c]	65-85-0	1	3	< BG [3]	--- [2]
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---	--- [4]				--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**1496**	**1574**	**763**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**4,474**	**11,462**	**2,242**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**0**	**9**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**15**	**51**	**11**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenylhydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 19: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Roggengranulat W1.

Probe	**E1001-1**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³]** [1]
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
VVOC (< C_6)					
Acetaldehyd [a]	75-07-0	60	43	20	--- [2]
Propanal [a]	123-38-6	1	1	1	--- [2]
Unbekannter Stoff	--- [4]	3	1	< BG [3]	--- [2]
VOC (C_6 – C_{16})					
Ethylmethylketon [a]	78-93-3	1	< BG [3]	< BG [3]	3000
evtl. 3-Hydroxy-2-butanon [c]	513-86-0	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Hexanal [a]	66-25-1		2	3	890
Hexamethylcyclotrisiloxan [c]	541-05-9	1	2	< BG [3]	--- [2]
Benzylalkohol [b]	100-51-6	2	< BG [3]	< BG [3]	440
evtl. Mequinol (Methoxyphenol) [c]	150-76-5	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Nonanal [b]	124,19,6	1	< BG [3]	< BG [3]	1300
evtl. Aminophenyl-ethanon [c]	551-93-9	1	1	< BG [3]	--- [2]
evtl. Methoxyvinylphenol [c]	7786-61-0	2	2	1	--- [2]
n-Tetradecan [b]	629-59-4	1	< BG [3]	< BG [3]	21000
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
nicht identifiziertes Isoalkan [d]	---	1	< BG [3]	< BG [3]	--- [2]
Auswertung					
TVOC (C_6 – C_{16})		**0**	**0**	**0**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})		**0**	**0**	**0**	
R		**0**	**0**	**0**	
Σ VOC $_{\text{ohne NIK}}$		**0**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene		**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)		**60**	**43**	**20**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 20: Ergebnisse der Emissionsuntersuchungen: Roggengranulat W2.

Probe	**E1001-2**	**Kammerkonzentration in [µg/m³]**			**NIK [µg/m³] 1)**
Substanz	**CAS-Nr.**	**3d**	**7d**	**28d**	
VVOC (< C_6)					
Acetaldehyd a)	75-07-0	35	24	11	--- 2)
Propanal a)	123-38-6	1	1	1	--- 2)
Aceton a)	67-64-1	3	8	2	--- 2)
1-Propanol c)	71-23-8	3	1	< BG 3)	2400
VOC (C_6 – C_{16})					
Essigsäure b)	64-19-7	< BG 3)	< BG 3)	51	500
Ethylmethylketon a)	78-93-3	1	< BG 3)	< BG 3)	3000
1-Pentanol b)	71-41-0	5	< BG 3)	< BG 3)	3600
2,3-Butandiol c)	513-85-9	1	1	< BG 3)	--- 2)
Butanol-2 b)	78-92-2	2	1	< BG 3)	3100
Hexanal a)	66-25-1	3	2	1	890
Benzaldehyd a)	100-52-7	< BG 3)	< BG 3)	2	90
Benzylalkohol b)	100-51-6	2	< BG 3)	< BG 3)	440
evtl. Mequinol (Methoxyphenol) c)	150-76-5	1	1	< BG 3)	--- 2)
Nonanal b)	124-19-6	1	< BG 3)	< BG 3)	1300
Benzoesäure c)	65-85-0	2	< BG 3)	< BG 3)	--- 2)
evtl. Aminophenylethanon c)	551-93-9	1	1	< BG 3)	--- 2)
n-Tetradecan b)	629-59-4	1	< BG 3)	< BG 3)	21000
SVOC (> C_{16} – C_{22})					
---	--- 4)				--- 2)

Auswertung				
TVOC (C_6 – C_{16})	**5**	**0**	**51**	
Σ SVOC (C_{16} – C_{22})	**0**	**0**	**0**	
R	**0,001**	**0,000**	**0,102**	
Σ VOC $_{ohne\ NIK}$	**0**	**0**	**0**	
Σ Cancerogene	**0**	**0**	**0**	
Σ VVOC (< C_6)	**35**	**32**	**11**	

1) NIK: niedrigste interessierende Konzentration (engl.: LCI, lowest concentration of interest)

2) Kein NIK-Wert festgelegt

3) < BG: kleiner Bestimmungsgrenze (1 µg/m³)

4) Keine CAS-Nummer vorhanden

a) Identifizierung und Quantifizierung der nach reaktiver Probenahme auf DNPH-Kartuschen gebildeten Dinitrophenyl-hydrazone mittels HPLC-DAD

b) Identifizierung und substanzspezifische Quantifizierung mittels TD-GC-MS/FID

c) Identifizierung mittels Spektrenbibliothek und Quantifizierung als Toluoläquivalent

d) eindeutige Identifizierung nicht möglich, Quantifizierung als Toluoläquivalent

Tabelle 21: Zur Geruchsaufklärung herangezogene Dämmstoffe.

Produkt	Einwaage [g]	Equilibrations-temperatur	Probenahmevolumina [mL]	Luftfeuchte im Pro-bengefäß
Hanf-Matte AF	100	RT	25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000	Umgebungsbedingungen
Holzfaser-Platte M1	100	RT		
Roggengranulat W2	100	RT		
Schafwollmatte E	50	RT	100, 200, 500, 1000, 2000	Umgebungsbedingungen gesättigt

Tabelle 22: Geruchliche Untersuchungen: Dämmmatten aus Hanffasern.

Geruchsqualität	Kovats-Index		Beitrag zum Gesamtgeruch	Substanz
	HP-5	OV-1701		
fäkalisch (schwefelig)	<500	<600	++	Methanthiol
fischig	<500	<600	++	Trimethylamin ?
butterartig	588	690	+++	2,3-Butandion
malzig	659	739	+++	3-Methylbutanal
kunststoffartig	684	770	++	1-Penten-3-on
grün	697	783	++	Pentanal
muffig, kunststoffartig	740	807	++	unbekannt

Geruchsqualität	Kovats-Index		Beitrag zum Gesamtgeruch	Substanz
	HP-5	OV-1701		
kunststoffartig	777	868	+	1-Hexen-3-on
grün	800	886	+++	Hexanal
fruchtig, süß (Hustenbon-bon)	832	893	+++	Methylpentanoat ?
seltsam	897	994	++	unbekannt
kartoffelartig	903	1052	+++	3-Methylthiopropanal
röstig	921	1019	+++	2-Acetyl-1-pyrrolin
pilzartig	980	1072	+	1-Octen-3-on
citrusartig	1004	1092	++	Octanal
honigartig	1055	1178	++	Phenylacetaldehyd
würzig	1110	1360	++	3-Hydroxy-4,5-dime-thyl-2(5H)-furanon
fettig, grün	1153	1259	+++	(Z)-2-Nonenal
fettig	1165	1288	+	(E)-2-Nonenal

Tabelle 23: Geruchliche Untersuchungen: Dämmplatten aus Holzfasern.

Geruchsqualität	Kovats-Index		Beitrag zum Gesamt-geruch	Substanz
	HP-5	OV-1701		
butterartig	588	690	+	2,3-Butandion
malzig	659	739	+	3-Methylbutanal
sauer	620	790	++	Essigsäure
kunststoffartig	684	770	+	1-Penten-3-on
grün	697	783	+++	Pentanal
kunststoffartig	777	868	++	1-Hexen-3-on
grün, grasig	800	886	+++	Hexanal
stechend, schweflig, bitter, kressartig	822	(?)	+++	S-Verbindung (Sulfid ?)
süß, fruchtig (Hustenbonbon)	832	893	++	Methylpentanoat ?
fruchtig	854	903	+	Ethyl-3-methylbutanoat
terpenig	978	994	++	β-Pinen
fleischartig	870	930	+++	2-Methyl-3-furanthiol
holzig	903	985	++	Heptanal
fichtennadelartig	946	951	+	α-Pinen
kartoffelartig	903	1052	++	3-Methylthiopropanal
pilzartig	980	1072	++	1-Octen-3-on
citrusartig	1004	1092	++	Octanal
citrusartig	1102	1198	++	Nonanal
röstig, bitter, rauchig	1098	1242	+++	2-Methoxyphenol
fettig, grün	1153	1259	++	(Z)-2-Nonenal
fettig	1165	1288	++	(E)-2-Nonenal
fettig	1222	1362	++	(E,E)-2,4-Nonadienal
fettig	1325	1450	+	(E,E)-2,4-Decadienal

Tabelle 24: Geruchliche Untersuchungen: Schüttdämmung aus Roggengranulat.

Geruchsqualität	Kovats-Index		Beitrag zum Gesamtgeruch	Substanz
	HP-5	OV-1701		
seifig (phenolisch, kaugummiartig)	1300	1475	++	2-Aminoacetophenon
butterartig	588	690	+	2,3-Butandion
grün	800	886	+	Hexanal
fruchtig	854	903	+	Ethyl-3-methylbutanoat
citrusartig	1004	1092	+	Octanal

Tabelle 25: Wichtigste Geruchsstoffe von trockener und feuchter Schafwolle

Geruchsqualität	Kovats-Index		Beitrag zum Gesamtgeruch		Substanz
	HP-5	OV-1701	trocken	feucht	
butterartig	588	690	+	++	2,3-Butandion
malzig	659	739	-	+	3-Methylbutanal
grün	697	783	+	++	Pentanal
stechend	740	807	+	+	unbekannt
kunststoffartig	777	868	+	+	1-Hexen-3-on
grün	800	886	++	++	Hexanal
röstig	921	1019	+	++	2-Acetyl-1-pyrrolin
pilzartig	980	1072	++	++	1-Octen-3-on
metallisch	989	1065	+	++	unbekannt
citrusartig	1004	1092	+	+	Octanal
phenolisch, mistartig	1085	1309	+	++	p-Kresol
bitter, rauchig	1098	1242	+	+	2-Methoxyphenol
fettig, grün	1153	1259	+	+	(Z)-2-Nonenal
fettig	1165	1288	+	++	(E)-2-Nonenal
bitter	1175	1390	-	+	3-Ethylphenol (2,3,-Dimethylphenol)
citrusartig	1102	1198	-	+	Nonanal
seifig	1200	1298	-	+	Decanal

- geruchlich nicht wahrnehmbar, Substanz nicht vorhanden bzw. Konzentration unter der Geruchsschwelle

+ schwach wahrnehmbar, Substanz nur in konzentrierten Proben bzw. großen Gasraumvolumina wahrnehmbar

++ deutlich wahrnehmbar, Substanz in verdünnten Proben bzw. kleinen Gasraumvolumina wahrnehmbar

Tabelle 26: Biologische Untersuchungen: Temperaturen und relative Luftfeuchte in den einzelnen Inkubationseinheiten.

Inkubations-einheit	Relative Luft-feuchte [%]	Temperatur [°C]
1	70	10
2	75	10
3	80	10
4	85	10
5	90	10
6	95	10
7	70	25
8	75	25
9	80	25
10	85	25
11	90	25
12	95	25

Tabelle 27: Biologische Untersuchungen: Verwendete Prüfpilze.

Art	Besonderheit
Aspergillus versicolor	trockenheitstolerant
Eurotium rubrum	trockenheitstolerant
Penicillium chrysogenum	trockenheitstolerant
Aureobasidium pullulans	häufiger Luftkeim
Cladosporium cladosporioides	häufiger Luftkeim
Ulocladium chartarum	häufiger Luftkeim
Chaetomium globosum	bei Feuchteschäden typisch
Scopulariopsis fusca	bei Feuchteschäden typisch
Mucor plumbeus	bei Feuchteschäden typisch
Rhodotorula mucilaginosa	Hefe

Tabelle 28: Übersicht der mikrobiologisch untersuchten Dämmstoffvarianten

	Rohstoff	Produktart	Anonymisierte Produktbezeichnung
1	Cellulose	Einblasdämmung behandelt	Cellulose-Einblasdämmstoff F1
2	Cellulose	Einblasdämmung unbehandelt	Cellulose-Einblasdämmstoff F2
3	Cellulose	Platte	Cellulose-Platte M
4	Flachs	Platte	Flachs-Platte G
5	Hanf	Matte	Hanf-Matte AF
6	Hanf	Stopfwolle	Hanf-Wolle L
7	Hanf	Matte mit Wirkstoffausrüstung	Hanf-MatteKH1 *)
8	Holz	Faserplatte	Holzfaser-Platte M1
9	Holz	Faserplatte mit Brandschutzausrüstung	Holzfaser-Platte M2
10	Holz	Faserplatte mit Stützfasern auf Maisbasis	Holzfaser-Platte M3
11	Roggen	Granulat	Roggengranulat W1
12	Roggen	Granulat	Roggengranulat W2
13	Schafwolle	Matte	Schafwoll-Matte E
14	Polystyrol	Dämmplatte	Polystyrol-Dämmplatte KH2 *)
15	Mineralwolle	Dämmplatte	Mineralwolle-Dämmplatte KH3 *)
16		Dämmplatte	Mineralische Dämmplatte KH4 *)
17		Dämmplatte	Mineralische Dämmplatte KH5 *)
18		Anstrich mit Dämmfunktion	Anstrich KH6 *)
19		Anstrich mit Dämmfunktion	Anstrich KH7 *)

*) KH1-7: Keine Herstellerangaben

1.8 Anhang 2: Bilder

Bild 3: Überlagerte FID-Chromatogramme von drei Cellulose-Einblasdämmungen aus unterschiedlichem Rohmaterial.

Bild 4: FID-Chromatogramm der Cellulose-Platte M

Bild 5: Überlagerte FID-Chromatogramme der Flachs-Platten G und K.

Bild 6: Überlagerte FID-Chromatogramme der Hanf-Matte AF und der Hanf-Stopfwolle L.

Bild 7: Überlagerte FID-Chromatogramme der Holzfaser-Platten M2 und M3.

Bild 8: Bewuchsverlauf verschiedener Materialien bei 25 °C und 95 %

Bild 9: Bewuchsverlauf verschiedener Materialien bei 10 °C und 95 %

Bild 10: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 25 °C und 95 %

Bild 11: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 10 °C und 95 %

Bild 12: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 25 °C und 95 %

Bild 13: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 10 °C und 95 %

Bild 14: Bewuchsverlauf der Vergleichsmaterialien bei 25 °C und 95 %, Wachstum bis zu Bewuchsklasse 5 sichtbar

Bild 15: Bewuchsverlauf der Vergleichsmaterialien bei 10 °C und 95 %, bei keiner der vier dargestellten Varianten sichtbares Wachstum

Bild 16: Hanf mit Wirkstoffausrüstung, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

Bild 17: Stroh-Lehmputz-Verbund, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

Bild 18: Stroh, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

Bild 19: Hanfwolle, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

Bild 20: Holzfaserplatte, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

Bild 21: Holz- und Maisfasern, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 22: Flachs, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 23: Roggenschüttung A, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 24: Roggenschüttung B, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 25: Holz mit Brandschutzausrüstung, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 26: Celluloseschüttung unbehandelt, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 27: Celluloseschüttung behandelt, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 28: Celluloseplatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 29: Hanfmatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 30: Polystyrol, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 31: Schafswollmatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 32: Mineralwolle, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 33: Mineralische Dämmplatte 2, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 34: Mineralische Dämmplatte 1, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 35: Anstrich mit Dämmfunktion 1, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

Bild 36: Anstrich mit Dämmfunktion 2, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

Bild 37: Die drei Schadenstoleranzbereiche mit einem beispielhaften Vertreter

Bild 38: Stroh-Lehmputz-Verbund, graue Sporenköpfchen und gelbe Kleistothecien

Bild 39: Hanfwolle, Mycel und Sporenköpfchen

Bild 40: Stroh, graues Mycel und weiße Sporenköpfchen

Bild 41: Holzfaserplatte, weiße Sporenköpfchen

Bild 42: Celluloseschüttung unbehandelt, keine sichtbare Sporulation

Bild 43: Celluloseplatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 44: Celluloseschüttung behandelt, keine sichtbare Sporulation

Bild 45: Hanfmatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 46: Schafswollmatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 47: Polystyrol, Aufimpfungsstelle mit abgestorbenen Sporen

Bild 48: Mineralwolle, keinerlei Wachstum

Bild 49: Roggenschüttung A, dichter Schimmelpilzrasen mit Kleistothecien

Bild 50: Roggenschüttung B, dichte Sporulation und zahlreiche gelbe Kleistothecien

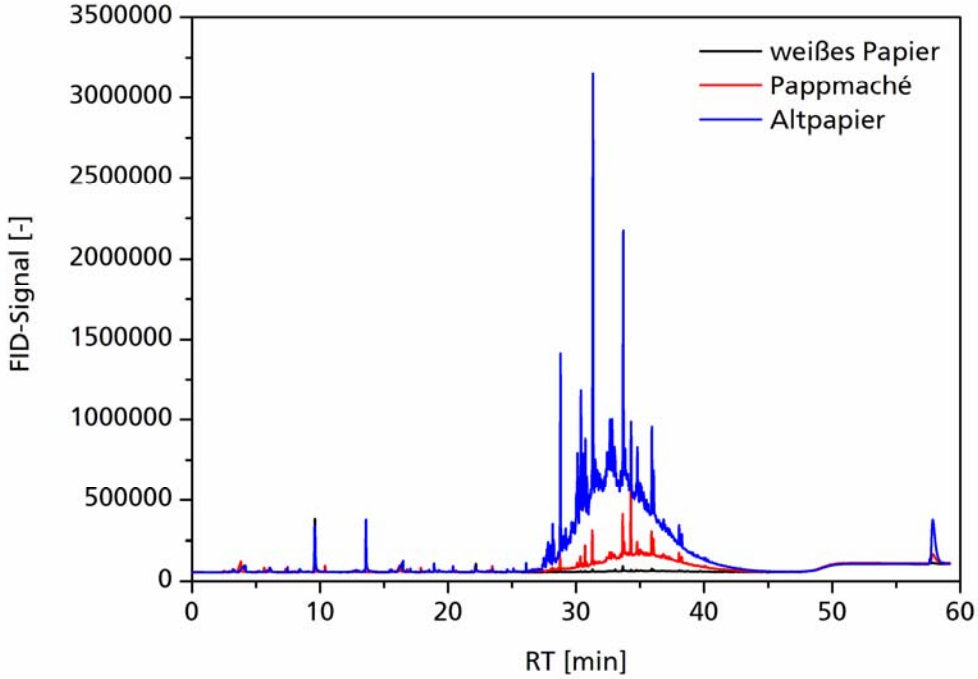


Bild 3: Überlagerte FID-Chromatogramme von drei Cellulose-Einblasdämmungen aus unterschiedlichem Rohmaterial.

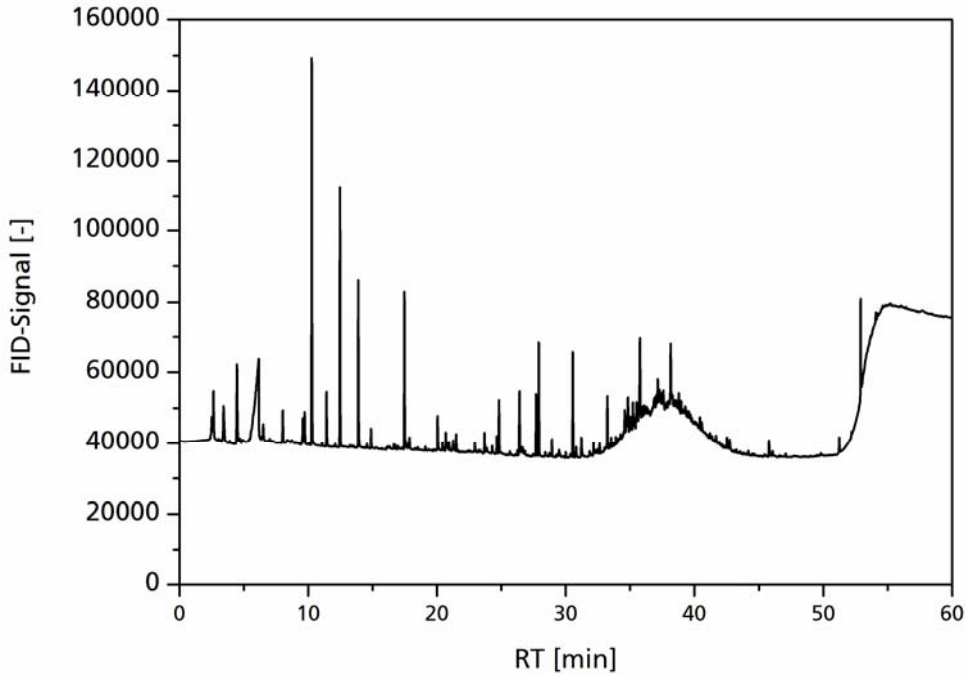


Bild 4: FID-Chromatogramm der Cellulose-Platte M

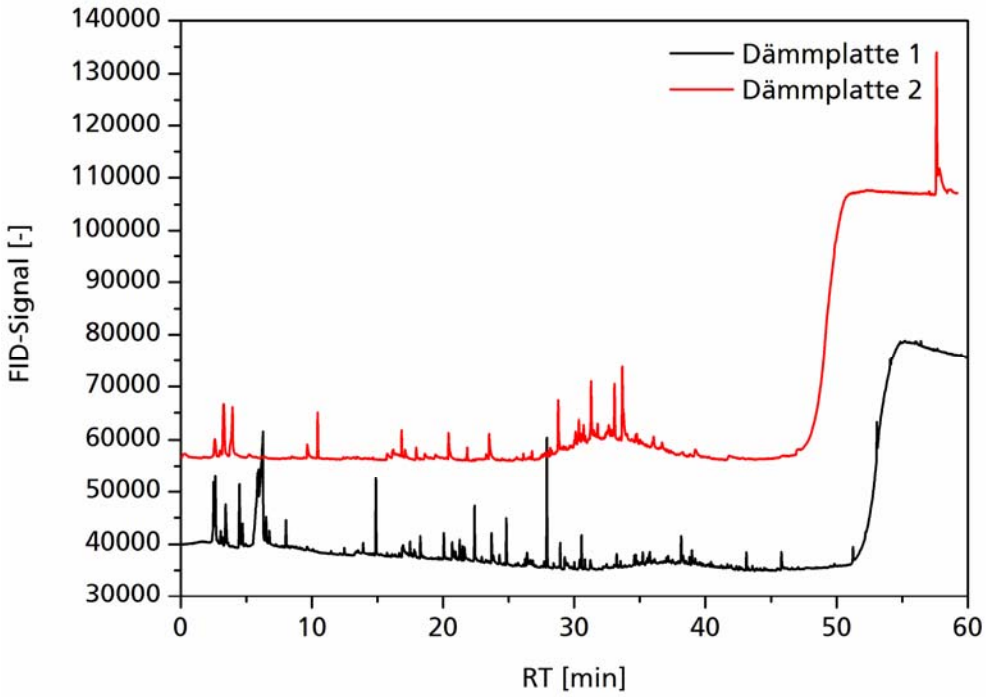


Bild 5: Überlagerte FID-Chromatogramme der Flachs-Platten G und K.

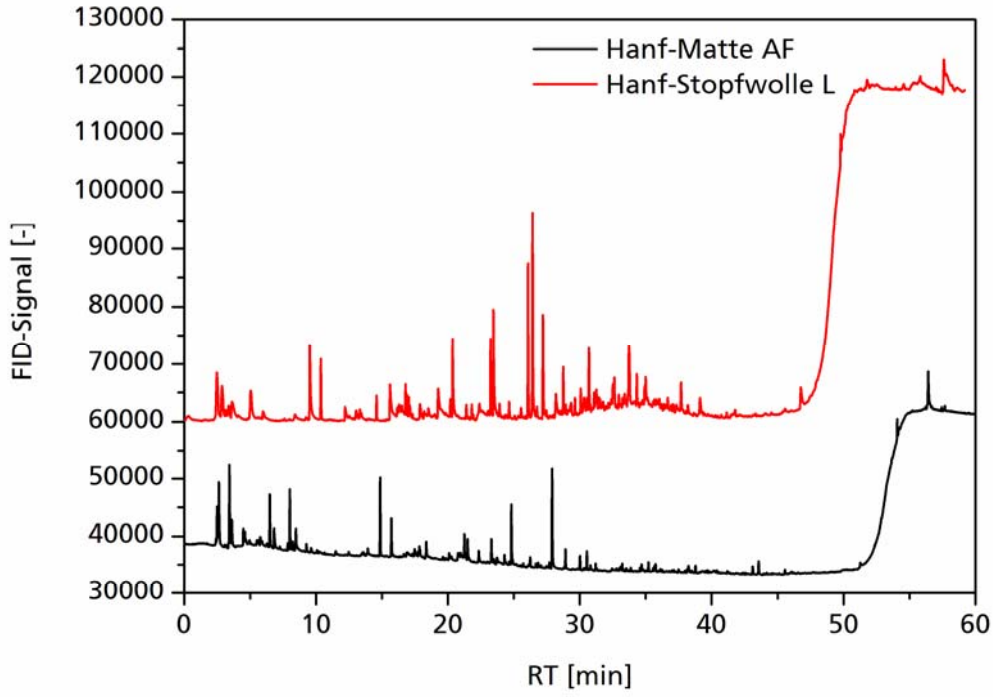


Bild 6: Überlagerte FID-Chromatogramme der Hanf-Matte AF und der Hanf-Stopfwolle L.

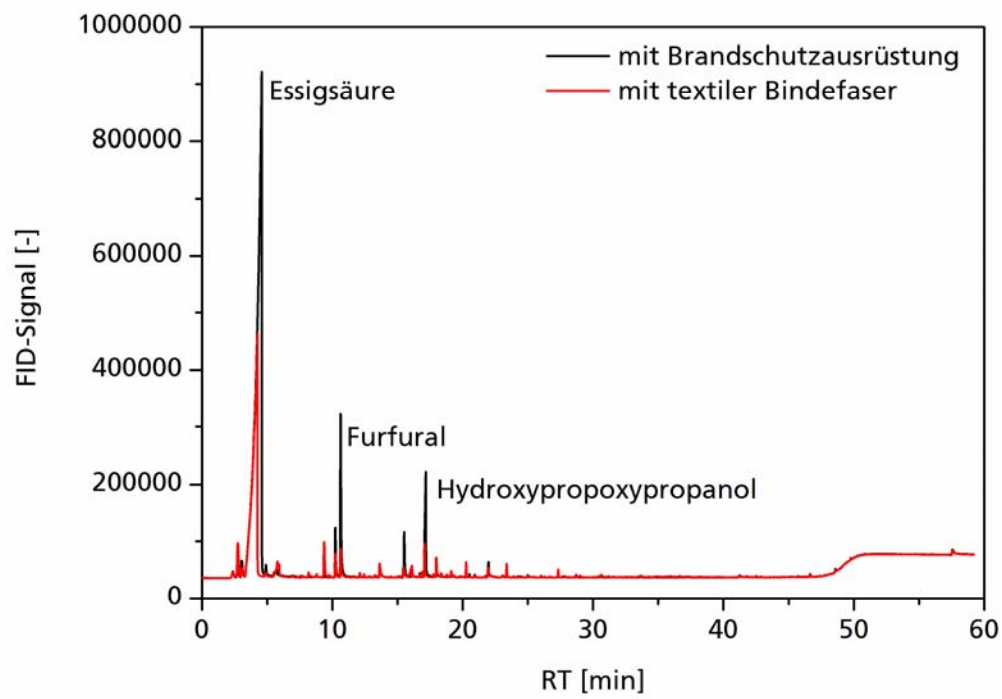


Bild 7: Überlagerte FID-Chromatogramme der Holzfaser-Platten M2 und M3.

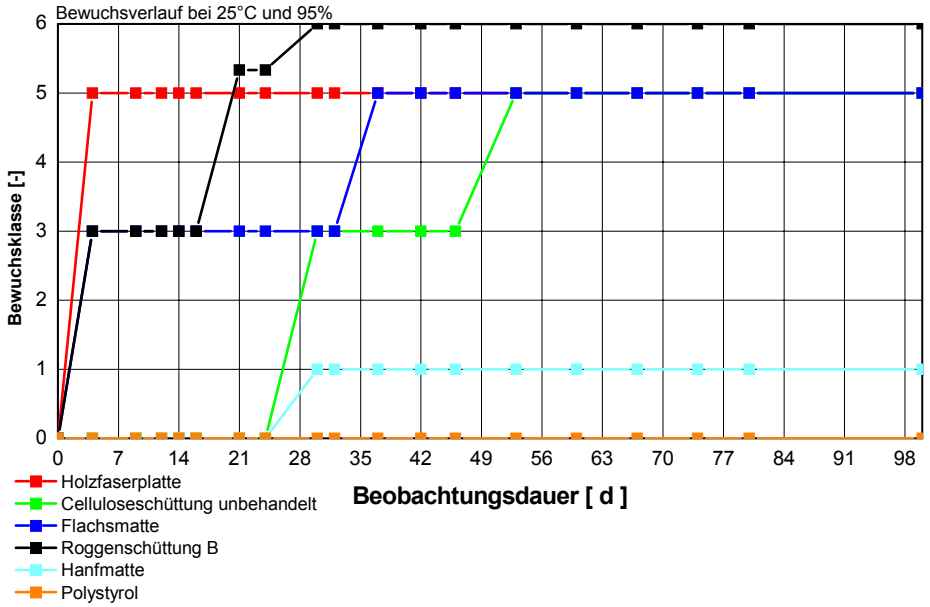


Bild 8: Bewuchsverlauf verschiedener Materialien bei 25 °C und 95 %

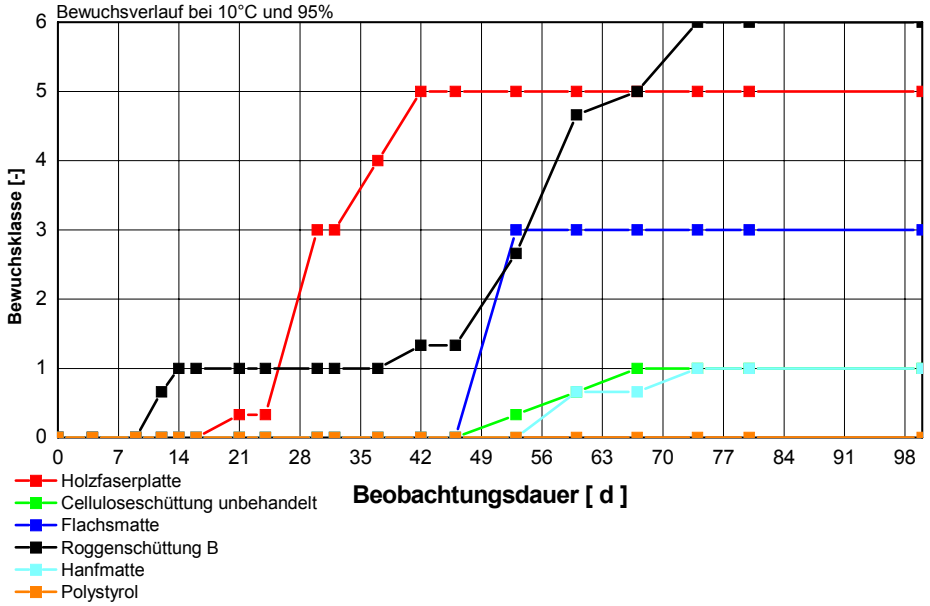


Bild 9: Bewuchsverlauf verschiedener Materialien bei 10 °C und 95 %

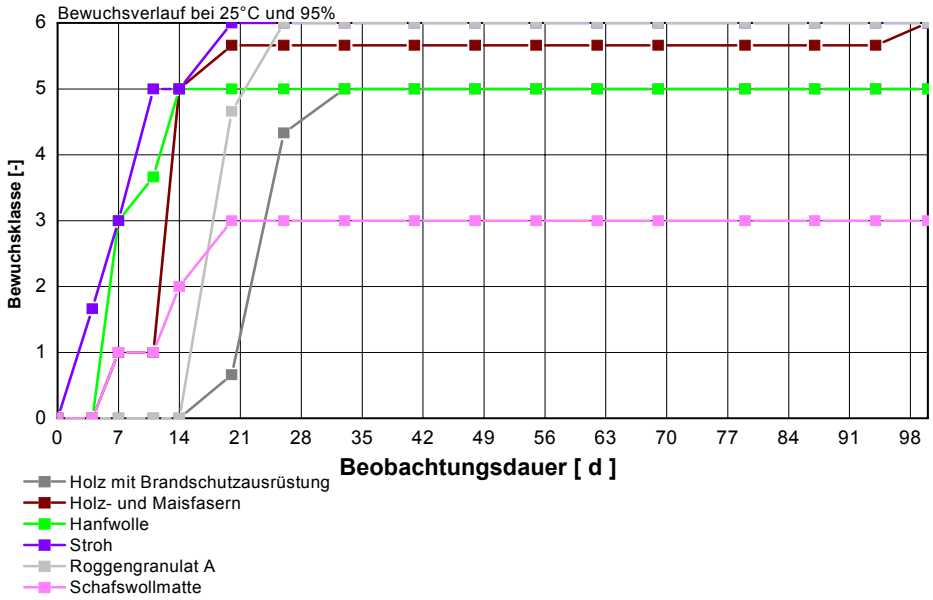


Bild 10: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 25 °C und 95 %

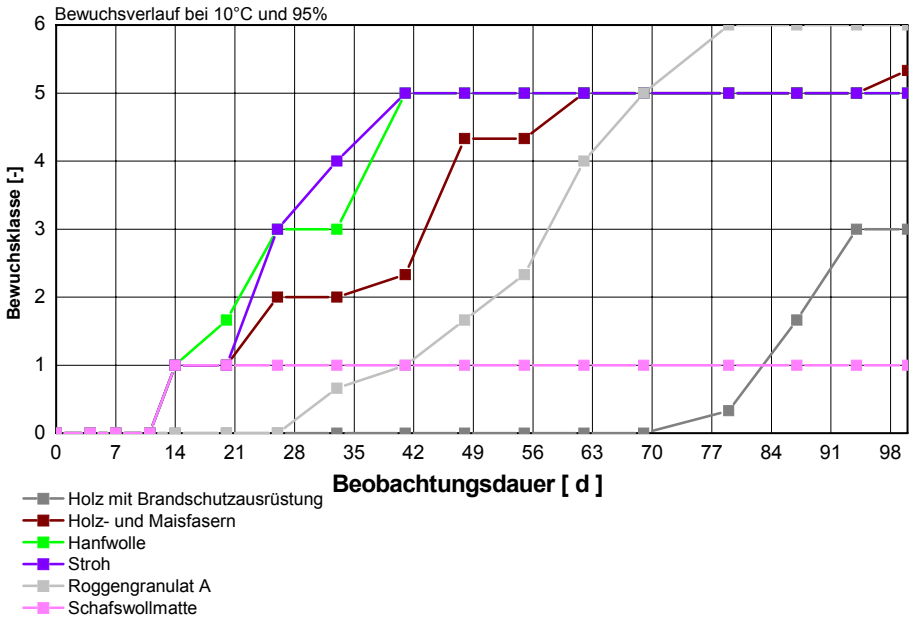


Bild 11: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 10 °C und 95 %

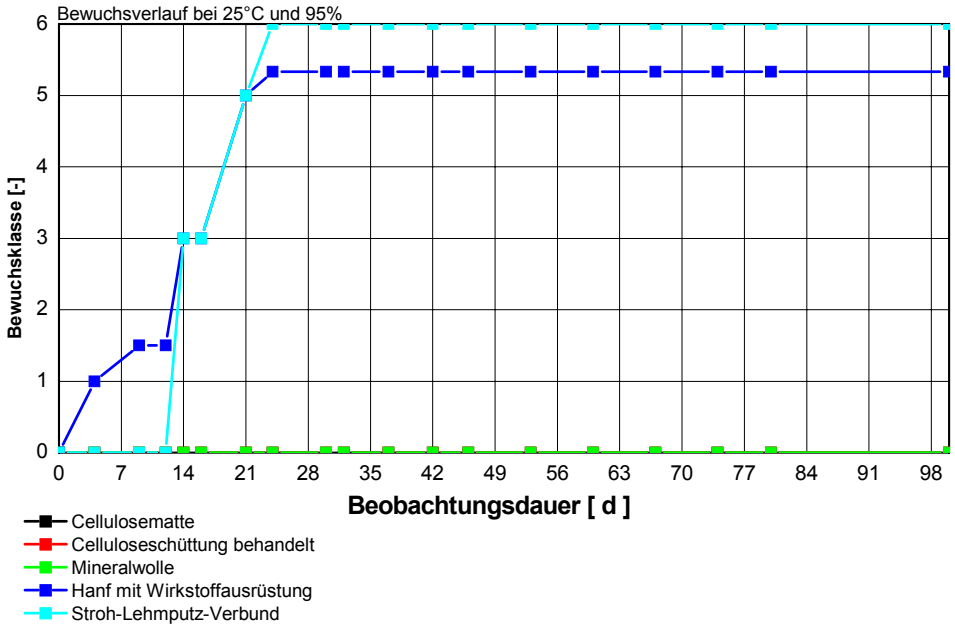


Bild 12: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 25 °C und 95 %

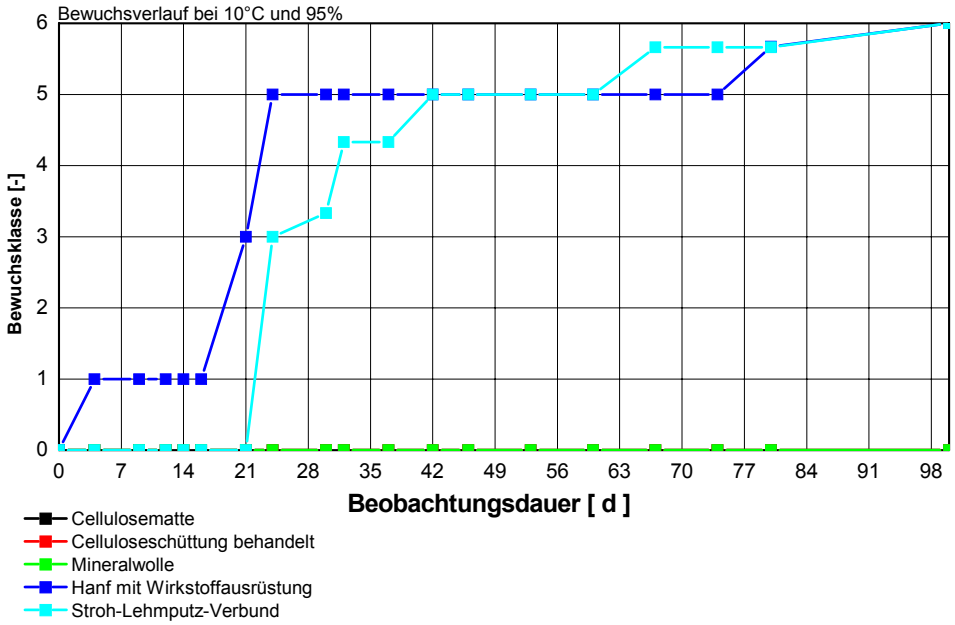


Bild 13: Bewuchsverlauf verschiedener Dämmstoffe bei 10 °C und 95 %

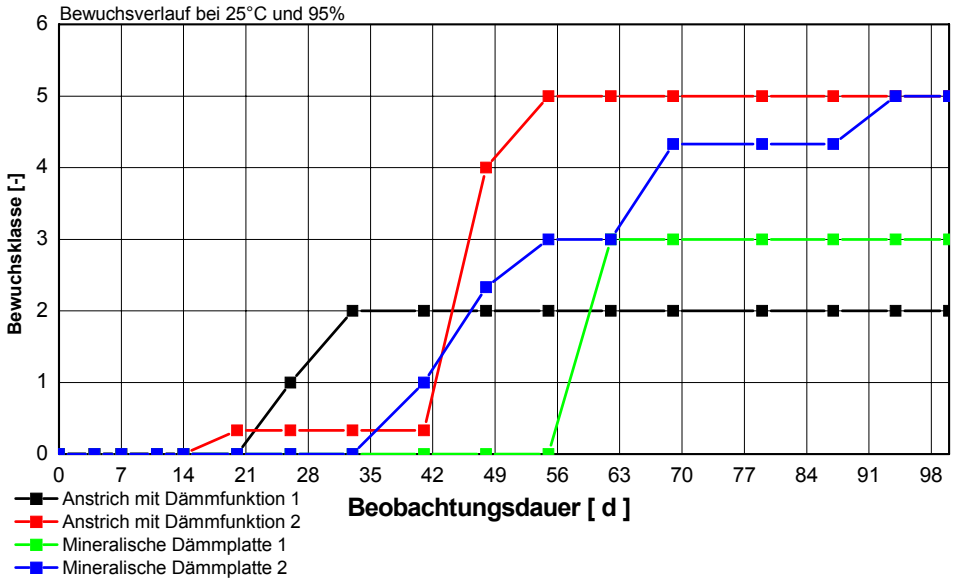


Bild 14: Bewuchsverlauf der Vergleichsmaterialien bei 25 °C und 95 %, Wachstum bis zu Bewuchsklasse 5 sichtbar

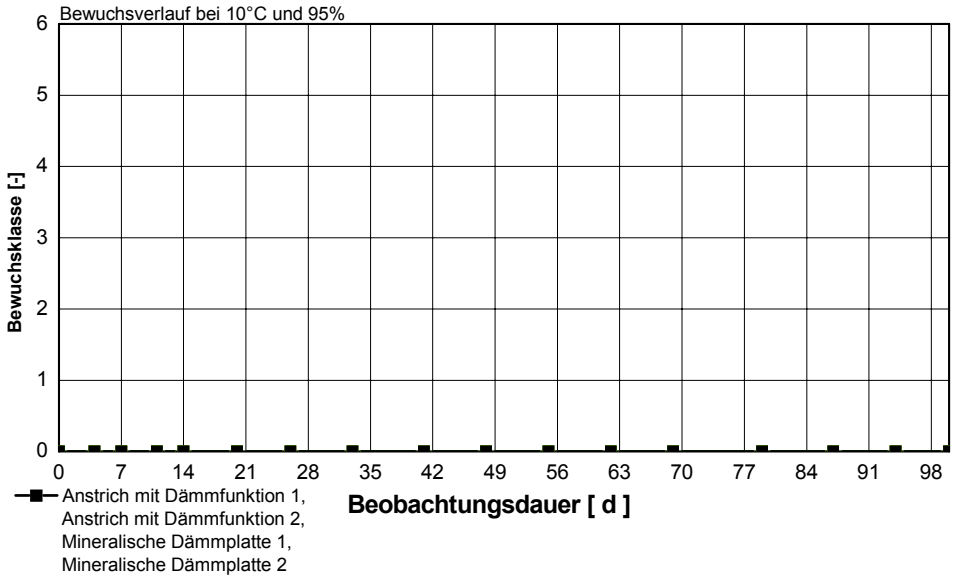


Bild 15: Bewuchsverlauf der Vergleichsmaterialien bei 10 °C und 95 %, bei keiner der vier dargestellten Varianten sichtbares Wachstum

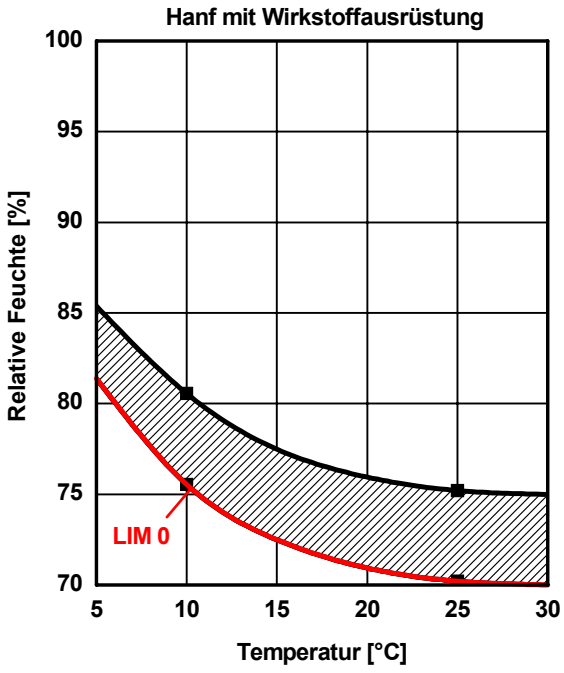


Bild 16: Hanf mit Wirkstoffausrüstung, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

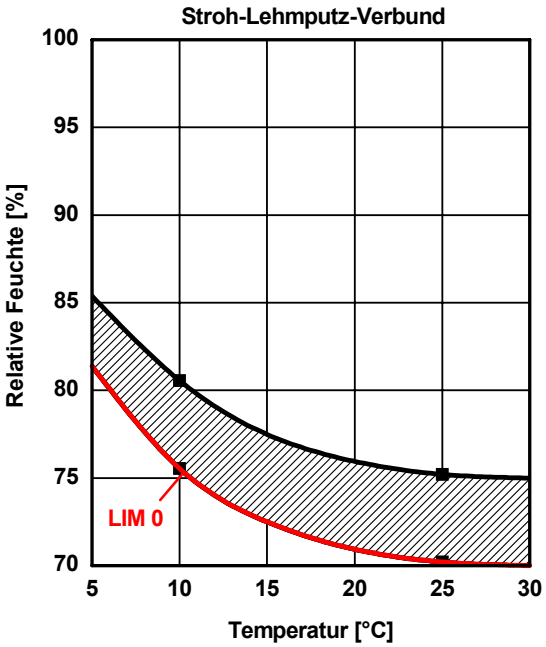


Bild 17: Stroh-Lehmputz-Verbund, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

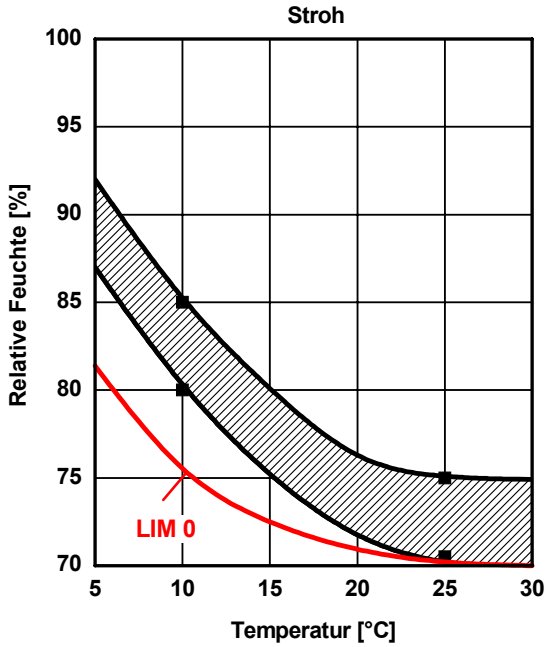


Bild 18: Stroh, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

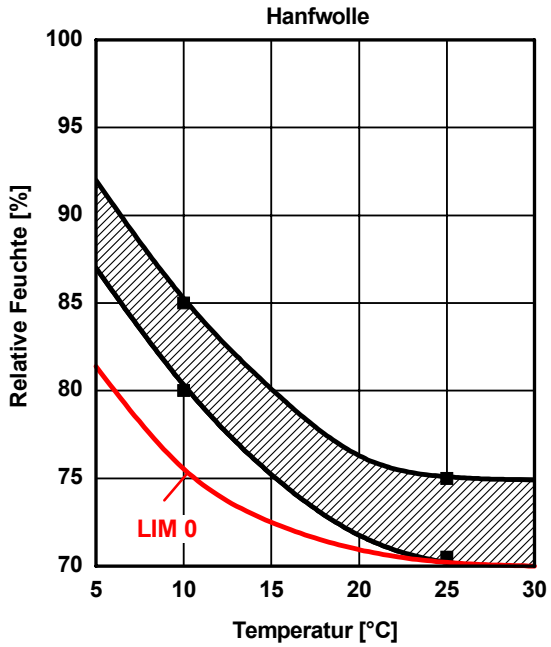


Bild 19: Hanfwolle, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

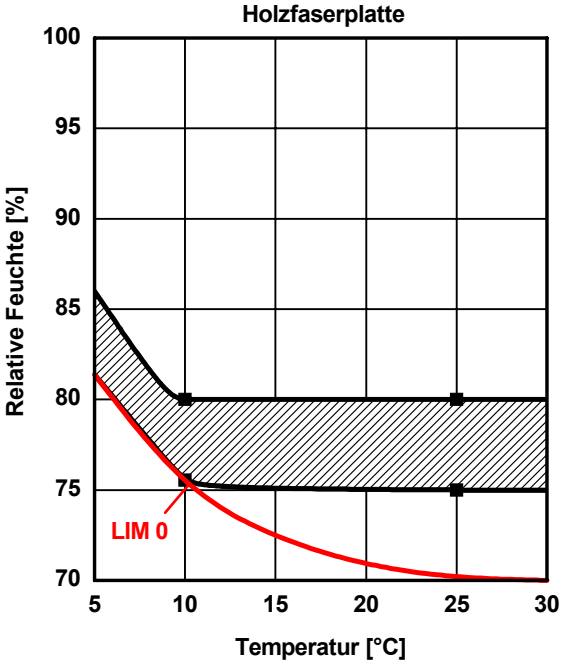


Bild 20: Holzfaserplatte, relativ geringe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse I.

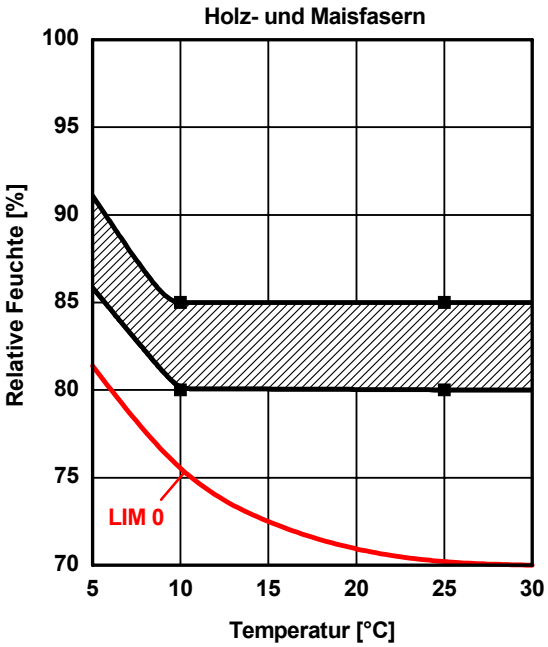


Bild 21: Holz- und Maisfasern, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

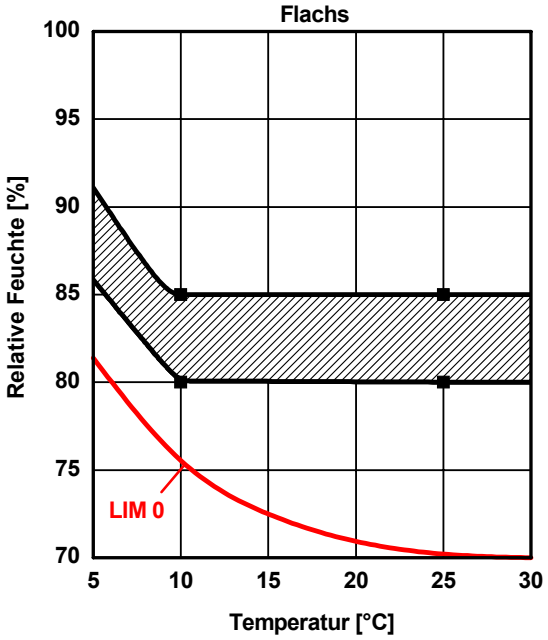


Bild 22: Flachs, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

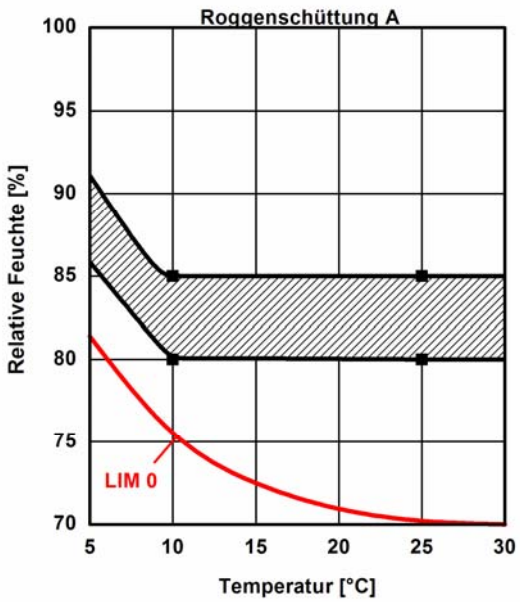


Bild 23: Roggenschüttung A, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

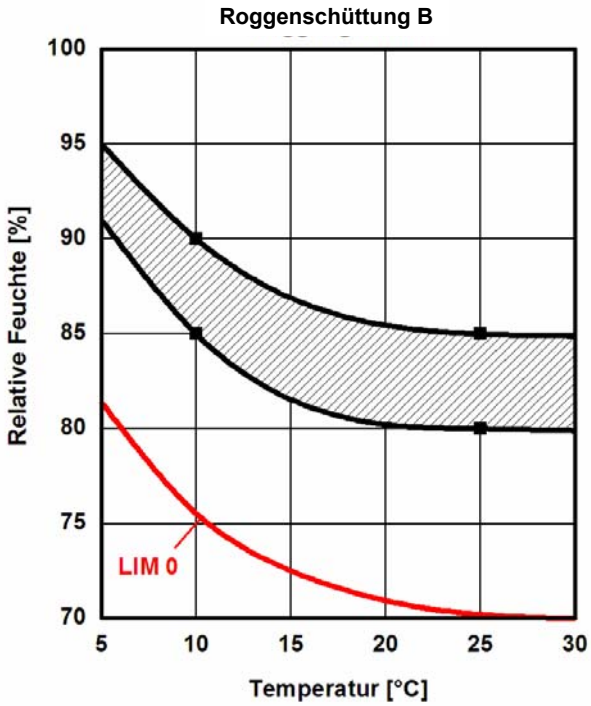


Bild 24: Roggenschüttung B, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

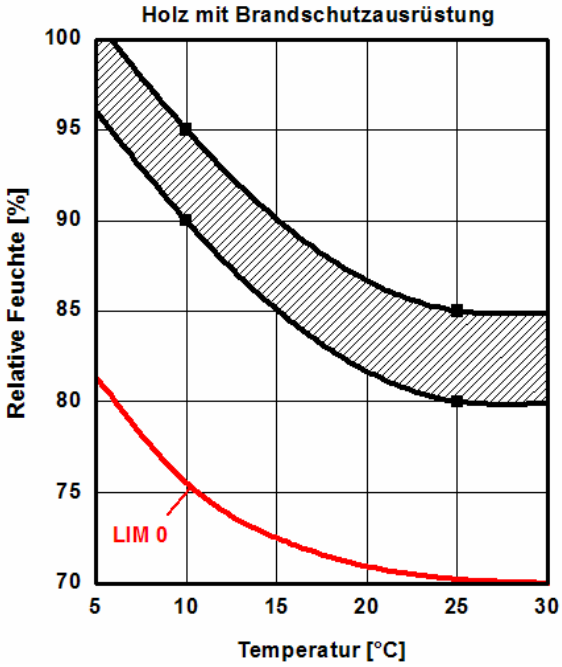


Bild 25: Holz mit Brandschutzausrüstung, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

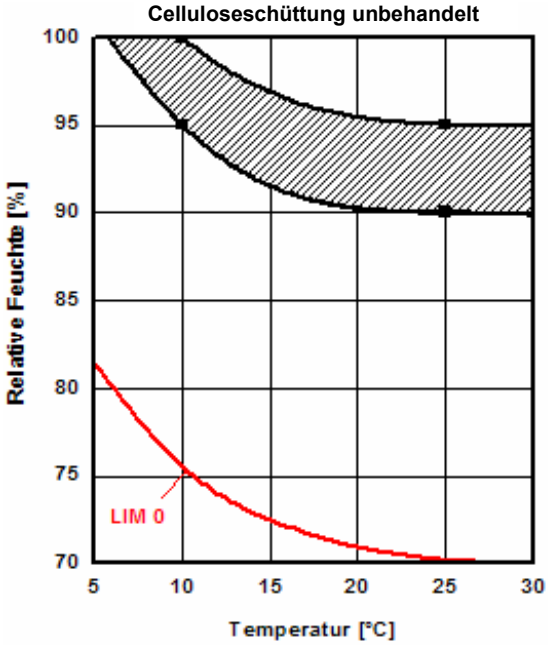


Bild 26: Celluloseschüttung unbehandelt, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

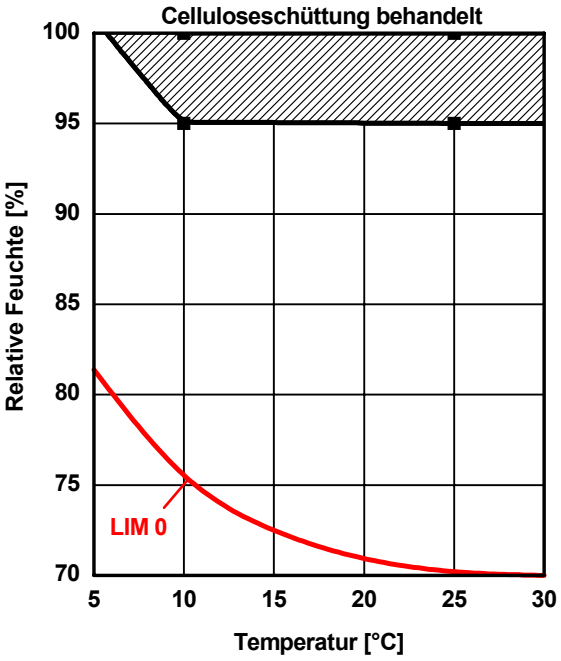


Bild 27: Celluloseschüttung behandelt, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

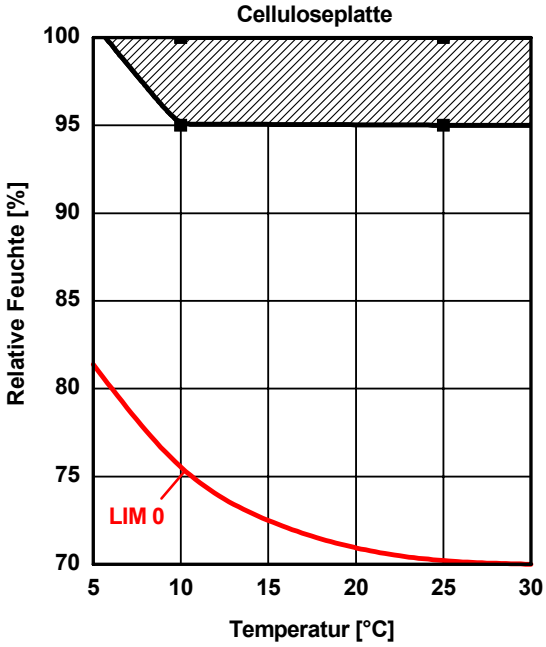


Bild 28: Celluloseplatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

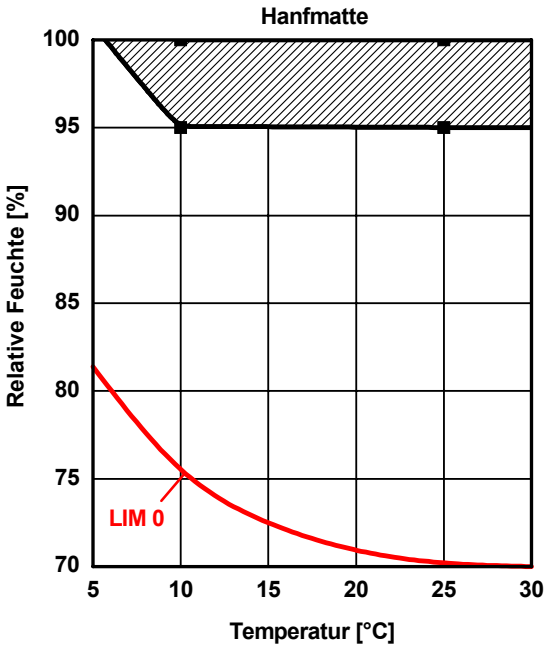


Bild 29: Hanfmatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

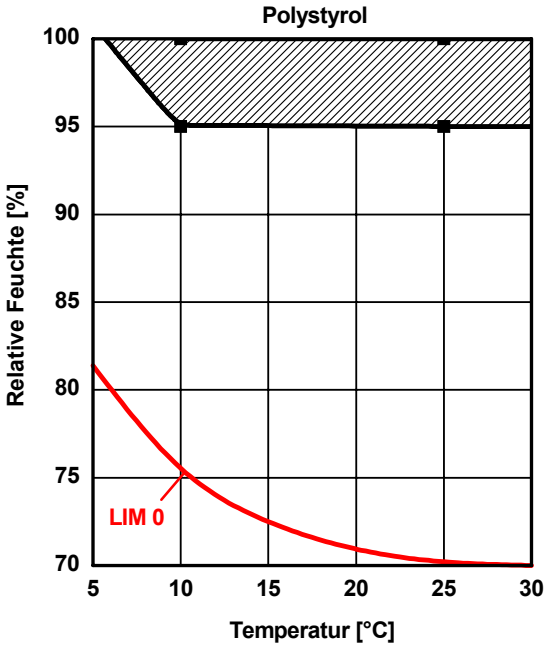


Bild 30: Polystyrol, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

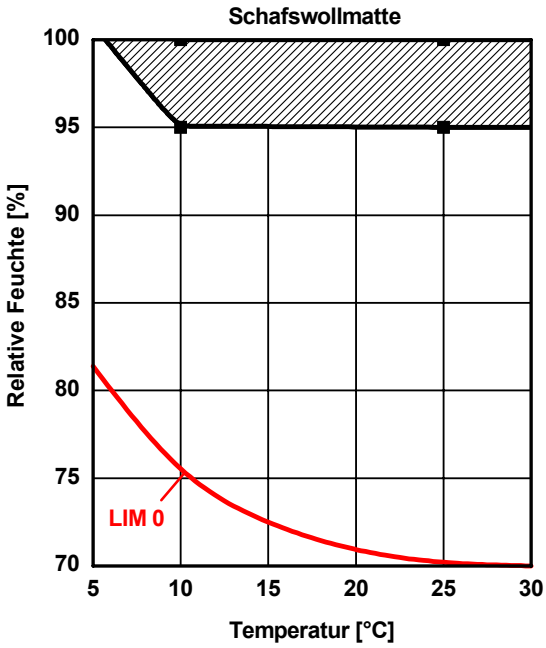


Bild 31: Schafswollmatte, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

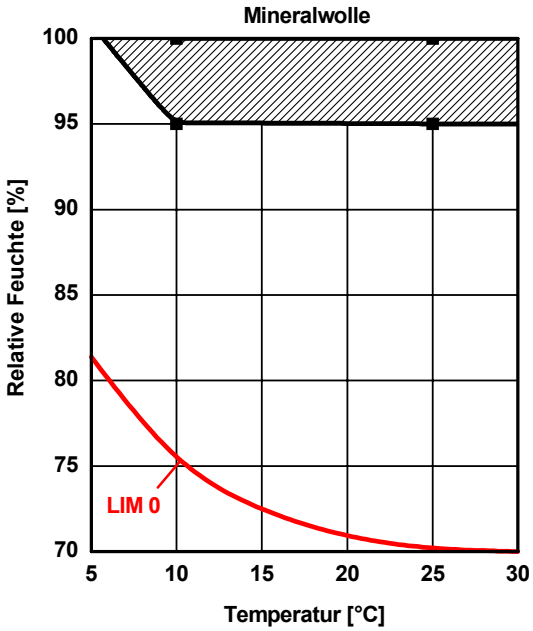


Bild 32: Mineralwolle, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

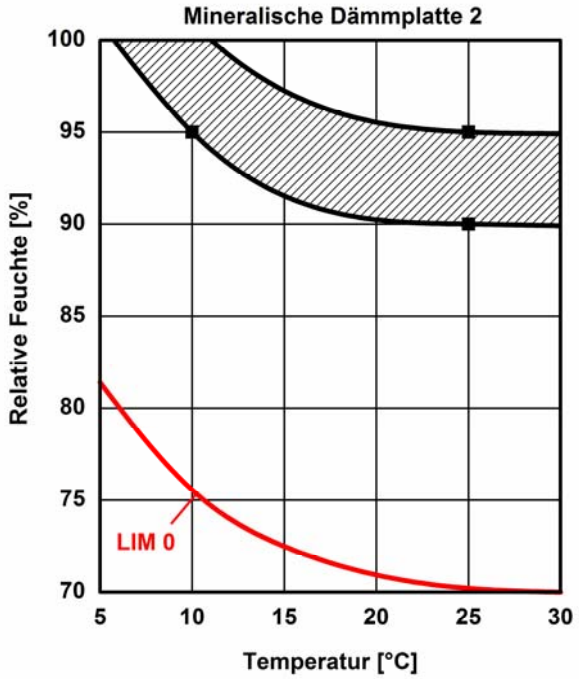


Bild 33: Mineralische Dämmplatte 2, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

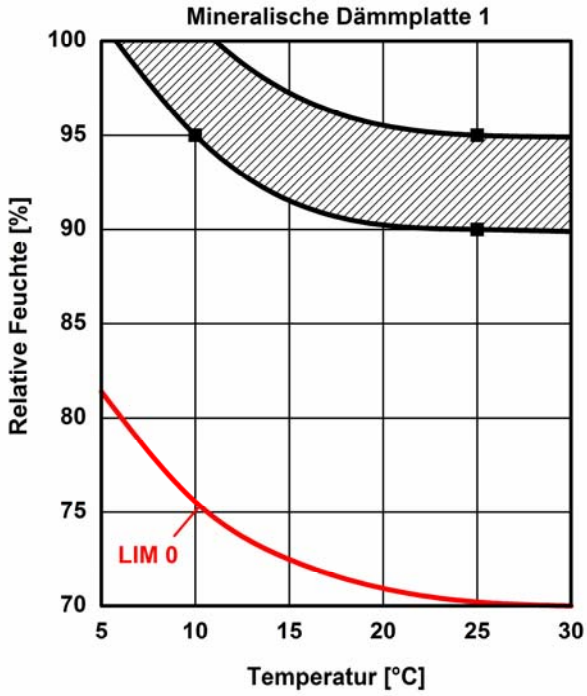


Bild 34: Mineralische Dämmplatte 1, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

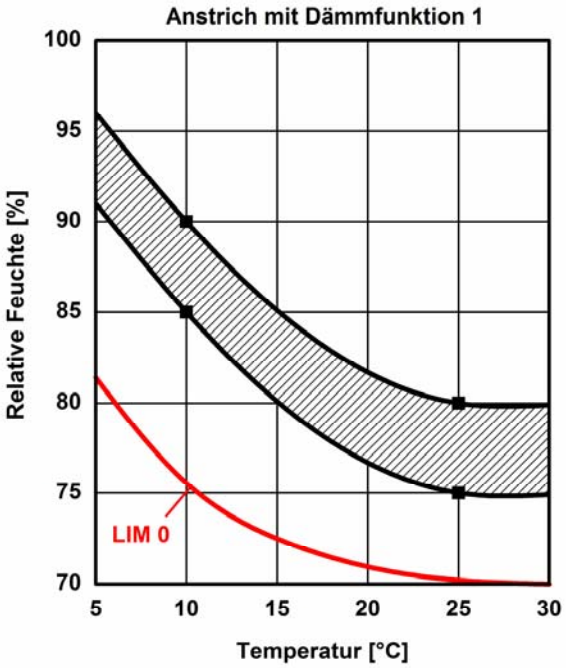


Bild 35: Anstrich mit Dämmfunktion 1, mittlere Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse II.

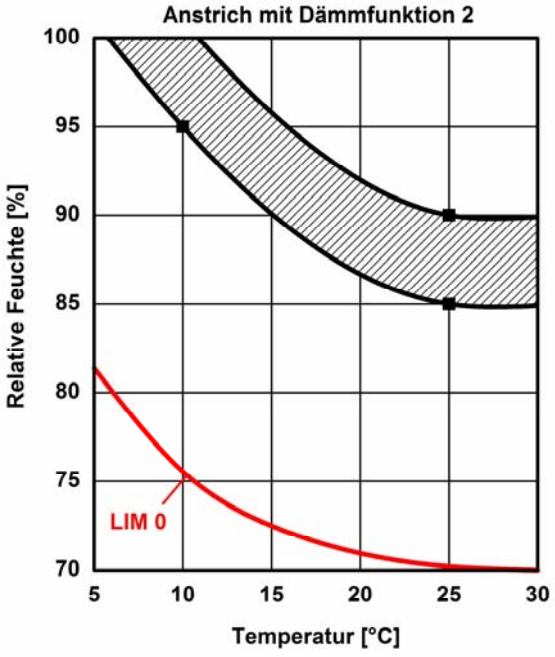


Bild 36: Anstrich mit Dämmfunktion 2, relativ hohe Schadenstoleranz, im Bereich Substratklasse III.

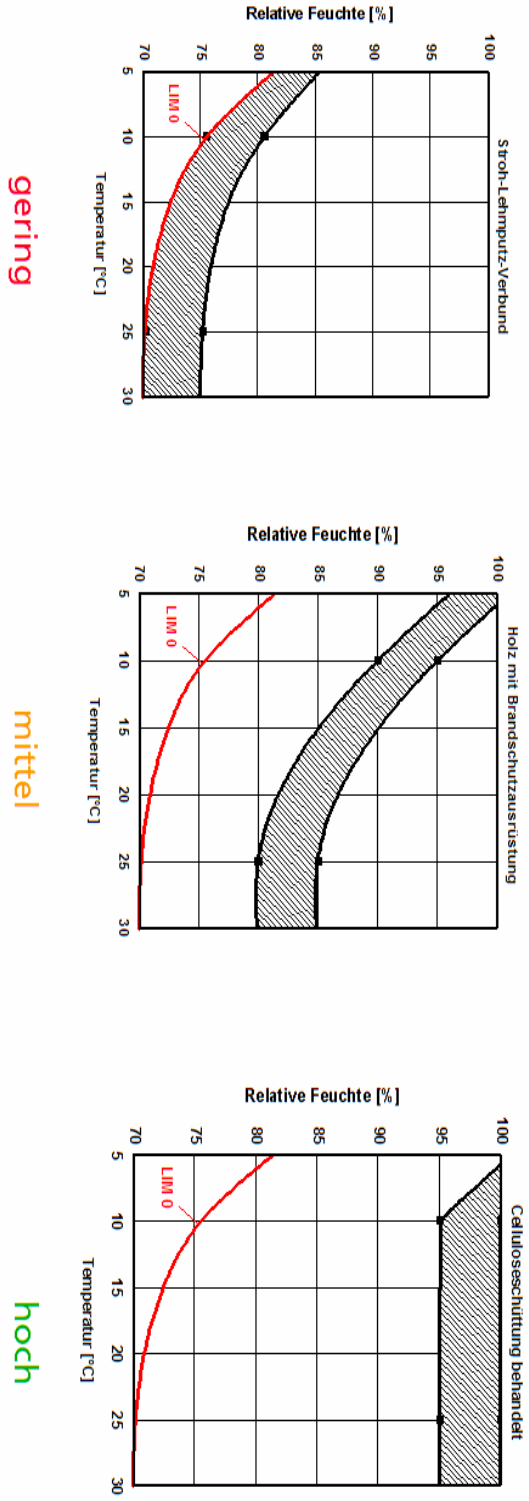


Bild 37: Die drei Schadenstoleranzbereiche mit einem beispielhaften Vertreter

Bild 38: Stroh-Lehmputz-Verbund, graue Sporenköpfchen und gelbe Kleistothecien

Bild 39: Hanfwolle, Mycel und Sporenköpfchen

Bild 40: Stroh, graues Mycel und weiße Sporenköpfchen

Bild 41: Holzfaserplatte, weiße Sporenköpfchen

Bild 42: Celluloseschüttung unbehandelt, keine sichtbare Sporulation

Bild 43: Celluloseplatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 44: Celluloseschüttung behandelt, keine sichtbare Sporulation

Bild 45: Hanfmatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 46: Schafswollmatte, keine sichtbare Sporulation

Bild 47: Polystyrol, Aufimpfungsstelle mit abgestorbenen Sporen

Bild 48: Mineralwolle, keinerlei Wachstum

Bild 49: Roggenschüttung A, dichter Schimmelpilzrasen mit Kleistothecien

Bild 50: Roggenschüttung B, dichte Sporulation und zahlreiche gelbe Kleistothecien

2 Teilvorhaben 2: Entwicklung einer Methode zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen

2.1 Thema des Forschungsvorhabens

Das diesem Bericht zugrunde liegende Projekt „Entwicklung einer Methode zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen“ wurde als Teilvorhaben 2 im Rahmen des Verbundvorhabens „Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen“ bearbeitet und durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert. Im Projektverbund erfolgte eine Zusammenarbeit mit folgenden Partnern:

- Teilvorhaben 1:„Schimmelpilzresistente und emissionsarme Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen“ Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen
- Teilvorhaben 3a:„ Untersuchungen zur Optimierung des Brandverhaltens unter besonderer Berücksichtigung von Wärmeleitfähigkeit und Materialfeuchte“ Institut für Bauforschung und Betriebstechnik , Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL)
- Teilvorhaben 3b:„ Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene“ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, MPA Braunschweig

Der Kontakt zu Normungsgremien sowie die Vertretung der Interessen des IHD bei diesen Gremien erfolgten durch Frau Sabine Groeneveld.

2.2 Aufgaben- und Zielstellung

Projektziel war die Erarbeitung einer Labormethode zur Prüfung der Resistenz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen gegenüber Schimmelpilzen. Diese wurde zunächst als IHD-Verfahrensanweisung etabliert und soll mittelfristig als verbindliche Prüfnorm in die europäische Normung (u.a. für lose Dämmstoffe) einfließen.

Die von fachkompetenten Forschungs- bzw. Prüfeinrichtungen in einem sinnvollen Zeit- und Kostenrahmen durchzuführende Prüfmethode sollte die Bedingungen, die in der Praxis zu Schimmelpilzbefall führen, realistisch und reproduzierbar darstellen und eine praxisrelevante Klassifizierung der Dämmstoffe hinsichtlich ihrer Schimmelpilzbeständigkeit ermöglichen.

Die Prüfmethode sollte für alle relevanten nachwachsenden Rohstoffe, wie z. B. Holz und Cellulose, Hanf, Flachs, Getreide/Stroh oder Schafwolle, aber auch für Mineralfaserdämmstoffe und organische bzw. anorganische Dämmschüttungen (Perlite, Vermiculite, Flachsschäben, Holzspäne), anwendbar sein.

Daneben sollten derzeit marktübliche Dämmstoffe nach aktuell vorgeschriebenen Prüfmethoden (DIN EN 60068-2-10 sowie ÖNORM

B6010/EN ISO 846) sowie der modifizierten IHD-Prüfmethode vergleichend untersucht und hinsichtlich ihrer Schimmelpilzresistenz bewertet werden.

2.3 Ausgangssituation

2.3.1 Allgemeine Informationen zu Schimmelpilzen

Gegenwärtig sind etwa 200.000 Pilzarten beschrieben (Hawksworth 2001, 2004). Darunter sind ca. 70.000 *Ascomyceten* und *Deuteromyceten* sowie ca. 500 *Zygomyceten* bekannt, welche unter dem Begriff Schimmelpilze zusammengefasst werden. Schimmelpilze treten ubiquitär auf und gehören in der Regel zu den Erstbesiedlern auf einem breiten Spektrum von Substraten. Sie wachsen nahezu ausschließlich an der Oberfläche von Materialien. Sie bilden wie alle Pilze Zellfäden (Hyphen), die zu einem Geflecht, dem Myzel, verwachsen. Ihre Vermehrung erfolgt überwiegend oder ausschließlich vegetativ bzw. über ungeschlechtliche Konidiosporen, die meist sehr zahlreich gebildet werden.

Die Bezeichnung „Schimmelpilze“ umfasst keine systematisch abgegrenzte Pilzgruppe, sondern stellt vielmehr einen Sammelbegriff aus der Praxis dar, der im Wesentlichen Vertreter von 3 Klassen niederer Pilze vereint. Zu diesen gehören:

- *Deuteromyceten* (Fungi imperfecti), z. B. Arten der Gattungen *Aspergillus, Penicillium, Trichoderma* oder *Stachybotris*,
- *Ascomyceten* (Schlauchpilze), z. B. *Chaetomium globosum* (Bild 51), *Eurotium*- (Bild 52) und *Epicoccum*-Arten,
- *Zygomyceten* (Jochpilze), z. B. *Absidia-, Rhizopus*- und *Mucor*-Arten.

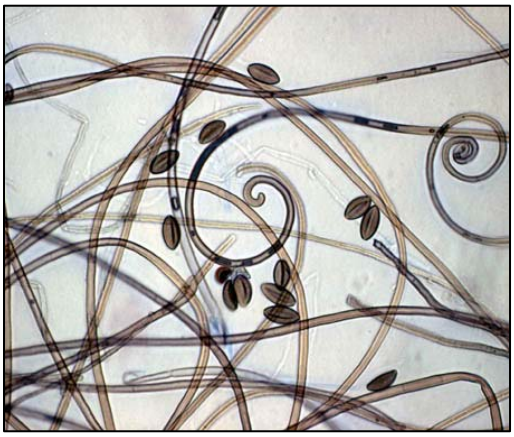


Bild 51: Ascosporen von *Chaetomium globosum* (700fach)

Bild 52: *Eurotium sp.* auf einem Seegras-Dämmstoff (50fach)

Die Mehrzahl der Schimmelpilze gehört zur Klasse der *Deuteromyceten.*

Schimmelpilze sind aufgrund eines wenig spezialisierten Stoffwechsels relativ anspruchslos und können unterschiedlichste Substrate besiedeln, wenn die Umgebungsbedingungen erfüllt sind. Sie ernähren sich von leicht verwertbaren Stoffen wie Zuckern, Eiweißen und Fetten. Als Nährstoffquellen können auch oberflächliche Ablagerungen wie Staub, Seifenreste, Ruß oder Pollen genutzt werden.

Leicht saure Substrate werden von den meisten Arten bevorzugt, jedoch werden pH-Werte bis maximal ca. 10,5 und minimal ca. 2,0 von einigen Arten toleriert. *Aspergillus niger* beispielsweise kann sogar bei einem pH-Wert von 2,0 wachsen (Reiss 1997). Die meisten Schimmelpilze sind mesophil mit einem Optimum bei ca. 25 °C. Das Myzel einiger Arten, wie z. B. von *Alternaria alternata* oder *Cladosporium herbarum*, wächst sogar bei Temperaturen unter 5 °C.
Die wichtigste Voraussetzung für Schimmelpilzwachstum ist eine hohe Feuchtigkeit. So muss die relative Luftfeuchtigkeit über 70 % liegen. Eine entscheidende Kenngröße für das Wachstum auf Materialien ist die aus dem Bereich der Lebensmittelanalytik bekannte Wasseraktivität a_w als Maß für das freie, d.h. für Keimung und Wachstum von Mikroorganismen verfügbare Wasser. Sie ist der Quotient aus der relativen Luftfeuchte über dem Substrat und der relativen Luftfeuchte über Wasser bei gleicher Temperatur. Die meisten Schimmelpilze benötigen für ein aktives Wachstum a_w-Werte zwischen 0,80 und 0,85.

In längeren Trockenperioden sterben die Pilze in der Regel nicht ab, sondern überdauern diese problemlos und setzen ihre Entwicklung bei wieder einsetzender Feuchtigkeit fort. Deshalb ist für die erfolgreiche Sanierung eines Schimmelpilzschadens die Entfernung des befallenen Materials oder die Abtötung der Schimmelpilze mit Hitze oder chemischen Mitteln notwendig.

Schimmelpilze können nachweislich gesundheitliche Beschwerden verursachen. So lösen Sporen bestimmter Pilzarten nach Einatmung Allergien aus (z. B. *Aspergillus flavus*, *Alternaria* spp.). Die von einzelnen Pilzarten, z. B. *Stachybotrys chartarum*, gebildeten Mycotoxine oder flüchtigen organischen Stoffwechselprodukte (MVOC) wirken gesundheitsschädigend (u.a. Mücke und Lemmen 1999, VDB 2007; Keller et. al. 2007). Einige Schimmelpilze, wie z. B. *Aspergillus fumigatus*, können menschliche Organe sogar direkt infizieren, insbesondere bei immunsupprimierten Menschen.

Aufgrund der von Schimmelpilzen ausgehenden potenziellen gesundheitlichen Gefährdung und der häufig damit verbundenen Geruchsbelästigung, aber auch weiterer Schadwirkungen durch Zerstörung oder optische Beeinträchtigung von Materialien, sind konsequente Maßnahmen zur Schimmelpilzvermeidung und im Schadensfall zur Sanierung erforderlich. Als nützliche Informationsquellen hierzu sei vor allem die vom Umweltbundesamt 2002 und 2005 herausgegebenen Schimmelpilz-Leitfäden genannt (www.uba.de).

2.3.2 Europäische Gesetzgebung und Normung

Den gesetzlichen Rahmen für Bauprodukte und damit auch für Dämmstoffe bildet die Europäische Bauproduktenrichtlinie (Construction Products Directive, CPD; 89/106/EWG). Ziel der CPD ist die EU-weite Harmonisierung von Normen und Zulassungsverfahren. Im Zusammenhang mit der Umsetzung der CPD in nationales Recht in Form des Bauproduktengesetzes ist zwischen Regelungen und Vorschriften für Bauprodukte und deren Verwendung in Bauwerken zu unterscheiden. Hierfür existieren derzeit unterschiedliche Kompetenzen auf europäischer und nationaler Ebene (u.a. Jasch, Springborn 2006).

Nach CPD Art. 4 Abs. 2 gelten Bauprodukte als brauchbar, wenn sie wesentliche Anforderungen erfüllen und einer harmonisierten europäischen technischen Spezifikationen entsprechen. Dies sind insbesondere harmonisierte europäische Normen (hEN) oder Europäische Technische Zulassungen (ETA). Die Konformität eines Bauprodukts mit einer harmonisierten Norm oder einer ETA wird durch die CE-Kennzeichnung dokumentiert. Mit dieser ist zunächst ein Inverkehrbringen zulässig und von der prinzipiellen Brauchbarkeit auszugehen. Die Verwendbarkeit der Bauprodukte ist jedoch nicht in jedem Falle a priori gegeben. Daher behalten sich nationale Organisationen, z. B. das deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vor, auf nationaler Ebene weitere Anforderungen zu stellen, die durch nationale Anwendungsregeln fixiert sind.

Eine ETA kommt in Frage, wenn für ein Bauprodukt keine harmonisierte europäische Norm existiert oder das Produkt wesentlich von einer solchen abweicht. Die Erteilung einer ETA erfolgt durch die EOTA (European Organisation for Technical Approvals) und ihre Zulassungsstellen als Einzelzulassung auf Basis einer einvernehmlichen Stellungnahme aller europäischen technischen Zulassungsstellen im Rahmen eines sogenannten CUAP-Verfahrens (Common Understanding of Assessment Procedure) nach Art. 9 Abs. 2 CPD.

CUAP ist ein Konsultationsverfahren auf europäischer Ebene, um die Kompatibilität einer europäischen technischen Zulassung mit den Bestimmungen aller Mitgliedstaaten und somit die europaweite Akzeptanz zu gewährleisten. Das CUAP-Dokument bildet die Grundlage für die Erteilung der europäischen technischen Zulassung und kann in der Folge auch als Basis für weitere Einzelzulassungen verwendet werden. Es ersetzt jedoch nicht die spätere Erarbeitung einer Leitlinie (ETAG European Technical Approval Guideline), falls sich dies als notwendig herausstellen sollte.

Harmonisierte europäische Normen für Wärmedämmstoffe für den Hochbau existieren derzeit für werkmäßig hergestellte Produkte aus künstlichen Mineralfasern, Hartschäumen, Holzwolle, Blähperlit, Kork sowie Holzfasern (EN 13162 bis EN 13171). Für die Erteilung von ETA für Wärmedämmstoffe stehen derzeit folgende CUAP-Dokumente zur Verfügung:

- Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus Schafwolle (08/1997)
- Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus Flachsfasern (08/1997)
- Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus Hanffasern (02/2001)
- Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus pflanzlichen Fasern (10/2002)
- Werkmäßig hergestellte Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus pflanzlichen oder tierischen Fasern (06/2003)
- An Ort und Stelle geformte, lose geschüttete Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus pflanzlichen oder tierischen Fasern (06/2003)
- An Ort und Stelle geformte, lose geschüttete Wärme- und/oder Schallschutzprodukte aus Hanffasern zur Verwendung unter schwimmenden Estrichen (06/2004)
- Reisschalen als lose Schüttung für die Wärmedämmung (10/2003)
- Wärmedämmplatte aus mineralischem Material (02/2004)
- Holzspäne als lose Schüttung für die Wärmedämmung (10/2003)

Auf nationaler Ebene ist für nicht geregelte Bauprodukte auch weiterhin die Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch das DIBt oder einer baubehördlichen Zustimmung im Einzelfall möglich.

2.3.3 Anforderungen an die Schimmelpilzbeständigkeit

Gemäß CPD Art. 2 Abs. 1 sind Bauprodukte als brauchbar definiert, wenn sie "solche Merkmale aufweisen, dass das Bauwerk, für das sie durch Einbau, Zusammenfügung, Anbringung oder Installierung verwendet werden sollen, die ordnungsgemäßer Planung und Bauausführung die wesentlichen Anforderungen ... erfüllen kann...". Diese wesentlichen Anforderungen an Bauwerke sind:

- mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Nutzungssicherheit
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz

Die Forderung nach einer hinreichenden Schimmelpilzresistenz von Dämmstoffen lässt sich hier insbesondere von der dritten Anforderung ableiten. Allerdings enthalten die o.g. Normen für die geregelten Wärmedämmstoffe nach EN 13162 bis EN 13171 keine Anforderungen an diese Eigenschaften; auch für Bauholz gemäß EN 14080 und EN 14081 oder Holzwerkstoffe gemäß EN 13986 gibt es diese normative Anforderung nicht.

Offenbar sind die Bedenken gegen einen möglichen mikrobiellen Befall bei den nicht geregelten Wärmedämmstoffen größer. So ist im Mandat an CEN M/103 für Wärmedämmstoffe festgelegt, dass insbesondere für

lignocellulosehaltige Materialien eine Prüfung des Verhaltens gegenüber Schimmelpilzen erfolgen muss.

Auch wenn es an die geregelten Wärmedämmstoffe nach EN 13162 bis EN 13171 keine Anforderungen hinsichtlich der Schimmelpilzresistenz gibt, zeigt die Praxis, dass unter ungünstigen Umständen auch auf diesen Produkten (wie auch auf Holz oder Holzwerkstoffen) ein Schimmelpilzbefall möglich ist. So kommt es besonders in der Rohbauphase mit höheren Feuchtebelastungen hin und wieder zum Befall auf Unterdachplatten (Holzweichfaserplatten, Leicht-MDF). Auf der anderen Seite könnten lignocellulosehaltige Faserdämmstoffe auch ohne biozide Ausrüstung frei von Befall sein, solange normale klimatische (trockene) Verhältnisse im Bauwerk herrschen.

Die unterschiedliche Betrachtung von Baustoffen hinsichtlich der Anforderungen an die Schimmelpilzresistenz stellt damit einen gewissen Widerspruch dar, zumal Holz und Holzwerkstoffe einerseits und Dämmstoffe andererseits oft und großflächig aneinander grenzen und bei ungünstigen Verhältnissen gleichermaßen befallen werden.

2.3.4 Bestimmung und Bewertung der Schimmelpilzresistenz

Die Bestimmung der Schimmelpilzbeständigkeit von Wärmedämmstoffen im Rahmen eines allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungsverfahrens durch das DIBt erfolgt nach DIN EN 60068-2-10:2006 (vorher DIN IEC 60 068-2-10:1991). Diese Prüfmethode ist aus der Elektrotechnik entlehnt und wurde nicht material- und anwendungsspezifisch an die Dämmstoffprüfung angepasst. Im Rahmen der CUAP–Zulassung erfolgen Prüfungen zur Beständigkeit gegen mikrobiellen Befall dagegen nach der ÖNORM 6010:1999, wobei für die Bewertung die Kriterien der EN ISO 846:1997 angewendet werden müssen.

Bei beiden genutzten Prüfvorschriften sind die für die Dämmstoffprüfung erforderlichen Abweichungen und notwendige Spezifizierungen nicht verbindlich festgelegt; die konkrete Vorgehensweise und Handhabung liegt in der Verantwortung des jeweiligen Prüflabors. Eine Vergleichbarkeit der Prüfbefunde verschiedener Institutionen wird dadurch erschwert.

Zudem sind Interpretation bzw. Wertung der Prüfergebnisse nicht verbindlich geregelt; dies gilt sowohl für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungsverfahren als auch für ETA. So fordert das CUAP-Paper N 47 für lignocellulosehaltige Dämmstoffe zwar die Prüfung der Resistenz und definiert hier als Entscheidungskriterium "pass" und "fail", bleibt aber eine Auskunft darüber schuldig, wann (bei welcher Bewertungsstufe) ein Produkt diese Prüfung bestanden hat oder nicht. Nach üblicher Praxis werden hier die Produkte mit den Bewertungsstufen "0" und "1" als hinreichend beständig angesehen.

Allerdings kann eine ETA sogar im Falle eines Nichtbestehens ("fail") erteilt werden, wie das Beispiel "Zostera-Dämm" (ein loser Seegrasdämmstoff) zeigt. In der Zulassung wird ein hinreichend trockener Einbau gefordert. Damit ist die Leistungseigenschaft "Schimmelpilzresistenz" nur eine beschreibende Größe, an die (offenbar) keine wirkliche Mindestanforderung gestellt wird.

Das nach EN 17025:2005 vom DAP akkreditierte Laboratorium Biologische Prüfung der Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) hat in den zurückliegenden Jahren zahlreiche Forschungsprojekte und Prüfaufträge unter Anwendung der oben genannten Prüfmethoden bearbeitet. Dabei wurde deutlich, dass diese für die Prüfung insbesondere loser Dämmstoffe wenig geeignet sind. Dies betrifft vor allem

- die Vorgaben zur Prüfanordnung bzw. Formung eines "Prüfkörpers",
- die Frage, ob und – wenn ja – welche Pilzarten aufgeimpft werden,
- die Berücksichtigung der praxistypischen Belastung der Materialien (vor allem das Feuchteregime während der Prüfung),
- die Frage der Verwendung von Nährlösungen, die ein Schimmelpilzwachstum fördern,
- und nicht zuletzt die Bonitierung und daraus resultierende Bewertung des Dämmstoffes, d.h. die Festlegung von Klassifizierungskriterien.

Eine zuverlässige und reproduzierbare Bewertung der Schimmelpilzanfälligkeit von Dämmmaterialien ist mit den bisher eingesetzten Methoden nicht möglich. Weiterhin sind keine praxisrelevanten Kriterien für eine Klassifizierung (Ranking) der Materialien festgelegt. Dies ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für den funktionsgerechten Einsatz derselben.

Neben den bereits genannten Normen gibt es eine Reihe von weiteren Prüfverfahren, die für die Bestimmung der Schimmelpilzbeständigkeit verschiedener Materialien wie Holz, Textilien und Holzwerkstoffe eingesetzt werden können (u.a. DIN ISO 9022-11:2000-09, DIN V ENV 53 931:1993-01, EN ISO 846:1997-10, ASTM C 1338:2000, ASTM D 2020:1992). Diese sind für Dämmstoffe nicht direkt anwendbar, bieten jedoch die Möglichkeit, ausgewählte Arbeitsschritte oder Prüfparameter zu übertragen. In der Anlage 1 wird eine Übersicht über aktuell eingesetzte Prüfmethoden zur Bestimmung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien gegeben, die aus Sicht der Verfasser für die Dämmstoffprüfung besonders relevant sind. Daneben werden die wesentlichen Prüfparameter der einzelnen Methoden dargestellt.

2.3.5 Schimmelpilzbefall an Wärmedämmstoffen in der Praxis

Schimmelpilzschäden in Innenräumen sowie an Gebäuden haben in den letzten Jahren zugenommen und finden verstärkt Beachtung. Die resultierende gesundheitliche Gefährdung und die häufig mit dem Pilzbefall einhergehende Geruchsbelastung erfordern konsequente Maßnahmen zur Schimmelpilzvermeidung und im Schadensfall zur Sanierung.

Die Schimmelpilzentwicklung an Baumaterialien und Wohnungseinrichtung im Innenbereich ist vorrangig eine Folge erhöhter Feuchte. Häufige Ursachen dafür sind:

- Auffeuchtung der Baustoffe bei Transport und Lagerung,
- Einbau feuchter Baustoffe,
- Niederschläge bei ungeschützten Bauwerken,
- Verarbeitung von Nassbaustoffen (Mörtel, Putze, Estriche)
- Kondensation von Feuchtigkeit auf kühlen Oberflächen (Bau- und Nutzungsphase; innen und außen),
- Kondensation in der Konstruktion durch Fehler bei Planung (z. B. Wärmebrücken) oder Ausführung (z. B. undichte Anschlüsse, Leckagen in der luftdichten Ebene),
- Aufsteigende bzw. eindringende Feuchtigkeit, z. B. aus Leckagen.

Schäden treten besonders häufig während oder kurz nach der Bauphase auf; dies betrifft sowohl den Neubau als auch die Sanierung. Ursache dafür sind häufig ungünstige Situationen während des Bauablaufs, wenn sich die Bau- und Werkstoffe unzulässig auffeuchten und anschließend nicht getrocknet werden. Zudem erfolgt der Bezug nach der Gebäudefertigstellung oder Sanierung oft, bevor das Gebäude hinreichend ausgetrocknet ist.

In der Nutzungsphase werden dann ggf. noch zusätzlich beträchtliche Mengen Feuchtigkeit eingebracht, die nur durch gezielte Beheizung und Belüftung entfernt werden können.

Auch können Mängel in der Konstruktion und Bauausführung, z. B. fehlende Dampfbremsen, Leckagen oder unzureichende Dämmung, zu ungünstigen klimatischen Bedingungen mit hohen Feuchten führen, die das Schimmelpilzwachstum in Gebäuden auslösen und fördern. Die von der Energieeinsparverordung (EnEV) geforderten Maßnahmen des Wärme- und Feuchteschutzes dienen explizit auch der Vermeidung von Schimmelpilzbefall im Gebäude bzw. innerhalb der Konstruktion. Zu nennen sind hier funktionierende Konzepte für die Konstruktion (Dämm- und Dichtungsmaßnahmen) und für die Nutzung (Heizung und Lüftung). Hinsichtlich der Vorbeugung von Schimmelpilzbefall kommt der Ausbildung einer luftdichten Gebäudehülle bei mehrschaligen Konstruktionen eine besondere Bedeutung zu.

Obwohl die Ursachen und die bauphysikalischen Zusammenhänge im Grunde bekannt sind, kommt es immer wieder zum Schimmelpilzbefall. Gründe hierfür sind meist Zeit- und Kostendruck, aber auch Unkenntnis und Ignoranz. Wie die Erfahrung des Autors und anderer Sachverständiger bzw. Baubiologen zeigt, liegt die Sensibilitätsschwelle bei Schimmelpilzbefall – unabhängig von einer tatsächlichen Gefährdung – bei Verbrauchern außerordentlich niedrig.

Die Entwicklung von Schimmelpilzen wird nicht nur durch erhöhte Feuchten, sondern auch durch die Art der Baustoffe und Materialien begünstigt, wenn diese eine Nährstoffquelle darstellen und somit für die Besiedelung durch Organismen besonders anfällig sind. Dies trifft auch auf Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO) zu. So liefern beispielsweise cellulosehaltige Dämmstoffe den Schimmelpilzen eine Nährstoffquelle und haben eine hohe Sorptionskapazität sowie eine große spezifische Oberfläche.

Für Dämmstoffe liegt hinsichtlich Schimmelpilzbefall eine besondere Situation vor, da sie häufig in bauphysikalisch kritischen Bereichen eingesetzt werden und im Einbauzustand verdeckt sind. Eine Reinigung oder Desinfektion bei Pilzbefall ist aufgrund der Oberflächenstruktur und Porosität, insbesondere der NAWARO-Dämmstoffe, meist nicht möglich. Hier ist in der Regel ein Austausch der Dämmung erforderlich.

Anorganische bzw. künstliche Dämmstoffe haben ein sehr geringes, Baustoffe aus organischen bzw. lignocellulosehaltigen (und damit hygroskopischen) Rohstoffen ein höheres Befallsrisiko. Allerdings kann bei letzteren dieser Nachteil teilweise durch die temporäre Abpufferung hoher Luftfeuchten ausgeglichen werden. So wurde beispielsweise nachgewiesen, dass es häufig gar nicht erst zur Kondensation von Luftfeuchtigkeit an der Dämmstoffoberfläche oder zum Erreichen des Taupunktes in einer Bauteilschicht kommt (Scheiding 1998). Dies gilt vor allem für poröse Baustoffe, z. B. Holzfaserdämmplatten oder Cellulosedämmungen. Mineralische Materialien können von Schimmelpilzen zwar nicht abgebaut, aber überwachsen werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn an der Oberfläche Nährstoffe (Schmutz, Beschichtungen) verfügbar sind.

Es ist davon auszugehen, dass bei ordnungsgemäßer Planung und Ausführung von Bauwerken bzw. Baumaßnahmen kein Schimmelpilzbefall auftritt. Um das durch Unwägbarkeiten (Extremwitterung, Schäden) bestehende Restrisiko zu minimieren, sollten hinreichend beständige Dämmstoffe, Bau- und Werkstoffe eingesetzt werden. Dazu muss jedoch die Anfälligkeit dieser Materialien gegenüber Schimmelpilzen bekannt sein. Zur Ermittlung der Schimmelpilzanfälligkeit werden je nach Art der Materialien verschiedene biologische Laborprüfverfahren eingesetzt.

Die Notwendigkeit der Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen ergibt sich vor allem aus baurechtlichen Forderungen der Bauproduktenrichtlinie bzw. aus dem Bauproduktengesetz. So gehören Hygiene und Schutz der Gesundheit zu den wesentlichen Anforderungen an Bauwerke. Schimmelpilze können jedoch auch die Funktion der Baustoffe, bei Dämmstoffen insbesondere die Dämmleistung, beeinträchtigen. Die Bewertung und Klassifizierung des Verhaltens von Dämmstoffen gegenüber Schimmelpilzen ist deshalb eine wesentliche Basis zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit und ein Beitrag zu Erhöhung der Produktsicherheit. Aussagen zur Schimmelpilzbeständigkeit beeinflussen zudem in hohem Maße das Kaufverhalten der zunehmend für die Schimmelpilzproblematik sensibilisierten Verbraucher. Nicht zuletzt erfordert die Entwicklung von Produkten mit verbesserter Schimmelpilzbeständigkeit, z. B. durch Verwendung geeigneter Inhaltsstoffe oder Additive, die Anwendung standardisierter Prüfmethoden.

Die Verwendung von NAWARO-Dämmstoffen ist aus ökologischer Sicht wünschenswert. Dabei ist jedoch anzustreben, dass eine erhöhte Schimmelpilzgefährdung durch das verwendete Material ausgeschlossen wird. Im Einzelfall kann deshalb auf eine fungizide Ausrüstung nicht verzichtet werden.

2.4 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

2.4.1 Auswahl und Charakterisierung relevanter Dämmstoffe

2.4.1.1 Übersicht der Materialien

Tabelle 29 gibt einen Überblick über derzeit eingesetzte Wärmedämmstoffe. Bei der Auswahl des Versuchsmaterials wurden marktübliche Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sowie mineralische Dämmstoffe berücksichtigt. Weiterhin wurden geformte und lose Dämmstoffprodukte (Einblas- bzw. Schüttdämmstoffe) einbezogen. Eine Zusammenstellung aller Prüfmaterialien erfolgt in Tabelle 30.

Einzelproben des Untersuchungsmaterials sind in Bild 53 und Bild 54 dargestellt. Als Vergleichsmaterial wurden einheimische Bauhölzer (Kiefer-Splint, Fichte und Buche) eingesetzt.

Die meisten Dämmstoffe wurden von den Herstellern an das IHD geliefert. Die Probenahme für Hobelspanschüttung A-C und Cellulose-Einblasdämmstoff Q erfolgte vor Ort durch Mitarbeiter des IHD.

Tabelle 29: Übersicht über marktübliche Dämmstoffe

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO)		Anorganische bzw. künstliche Dämmstoffe		
Holz	Sonstige	Natürliche anorganische	Künstliche mineralische (MW)	Künstliche organische (Schäume)
Holzfasern (WF) Holzwolle (WW) Cellulose Hobelspäne	Baumwolle Flachsfasern Hanffasern Hanfschäben Kokosfasern Kork Schafwolle Schilf, Stroh	Expandiertes Perlite (EP) Expandiertes Vermiculite (EV) Blähton (LWA) Schaumglas	Glaswolle Steinwolle Basaltwolle	Expandiertes Polystyrol (EPS) Extrudiertes Polystyrol (XPS) Polyurethanschaum (PUR) Polyethylen (PE) Melaminharz

Die Schimmelpilzbeständigkeit der Dämmstoffe wird maßgeblich durch ihre Art und Zusammensetzung, insbesondere in Bezug auf organische Inhaltsstoffe und fungizide Additive, bestimmt. Daneben sind der pH-Wert (vgl. Pkt. 2.4.1.2) und das Feuchteverhalten (vgl. Pkt. 2.4.1.3) von besonderer Bedeutung.

Bild 53: Lose NAWARO-Dämmstoffe

Bild 54: Geformte Dämmstoffe

2.4.1.2 Untersuchung des pH-Wertes

Die meisten Schimmelpilze bevorzugen ein leicht saures Umgebungsmilieu (pH 5 bis 7) und werden durch ein stark alkalisches Milieu gehemmt bzw. unterdrückt (pH > 9). So wurde bereits nachgewiesen, dass zahlreiche anorganisch gebundene Holzwerkstoffe (z. B. zementgebundene Spanplatte, magnesitgebundene Faserplatte) mit pH-Werten von 9 bis 11 nicht von Schimmelpilzen befallen werden (Kruse et al. 2003). Auch viele Innenputze und Trockenbauplatten weisen pH-Werte oberhalb 11 auf und bieten damit Schimmelpilzen keine Entwicklungsgrundlage (Keller et al. 2007).

Die Bestimmung des pH-Wertes aller ausgewählten Dämmstoffe und Vergleichsmaterialien erfolgte nach IHD-Werkstandard WHIS 176:1987. Dabei werden jeweils 2 g des zu prüfenden Materials in 50 mL kohlensäurefreiem destilliertem Wasser unter Rühren 15 min suspendiert. Der pH-Wert des flüssigen Überstands wird anschließend gemessen (3 Parallelproben). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 30 dargestellt.

Eine hohe Alkalität (≥ 10) wiesen die Schüttdämmstoffe aus Roggengranulat sowie eine Produktvariante der mit Soda behandelten Hobelspäne auf. Bei diesen Materialien war eine hohe Schimmelpilzbeständigkeit anzunehmen. Für weitere Produkte, z. B. behandelte Dämmstoffe auf Cellulosebasis, wurden pH-Werte nahe 9 bestimmt. Hier konnte vermutet werden, dass die Schimmelpilzbildung zumindest gehemmt wird. Eine Reihe von Dämmstoffen und Rohmaterialien sowie die Vollhölzer wiesen neutrale bis leicht saure pH-Werte auf. Hier war zunächst unter bestimmten Bedingungen (z. B. kein Zusatz fungizider Additive) von einer erhöhten Schimmelpilzanfälligkeit auszugehen.

Tabelle 30: Eigenschaften der Dämmstoffe und Vergleichsmaterialien

Produktgruppe	Produktbeschreibung	pH-Wert[1]	Ausgleichsfeuchte[2] in [%] nach Lagerung im Klima		
			20/65	23/80	28/>95
Organische (natürliche) Dämmstoffe (NAWARO) – geformt					
Schafwollmatte A	behandelt mit Borsalz, sonstige Inhaltsstoffe: Naturkautschukmilch, Eisenoxid, Kalk, Tonerde	8,4	7,7	10,8	36,5
Flachsmatte G1	behandelt mit Borsalz, sonstige Inhaltsstoffe: Polyester-Stützfasern, Ammoniumphosphat	6,2	6,4	8,6	256,2
Flachsmatte G2		5,7	6,4	8,3	204,4
Flachsmatte K	behandelt mit Borsalz, sonstige Inhaltsstoffe: thermisch aufgeschlossene Kartoffelstärke	8,7	8,0	8,3	238,0
Flachsmatte AG	unbehandelt	6,1	6,7	8,2	30,2
Seegrasmatte AG	unbehandelt	6,7	14,3	22,2	154,4
Celluloseplatte M	behandelt mit Borax/Borsäure, Bindemittel Polyolefin	8,8	7,6	9,6	134,0
Holzfaserplatte AF1	unbehandelte Holzweichfaserplatte	5,2	6,8	9,4	32,3
Holzfaserplatte AF2		4,9	7,7	10,1	34,8
Organische (natürliche) Dämmstoffe (NAWARO) – lose					
Schafwolle-Rohmaterial A	unbehandelt	7,5	7,1	7,5	29,7
Flachs-Rohmaterial K	unbehandelt	7,2	5,9	8,2	36,7
Flachs/Polyester-Rohmaterial G	unbehandelt	7,4	6,3	9,2	35,2
Seegras-Rohmaterial AG	unbehandelt	8,1	10,8	20,8	148,8
Cellulose-Rohmaterial Q	unbehandelt	8,8	6,6	9,7	52,3
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	behandelt	8,8	7,1	9,1	47,8
Cellulose-Einblasdämmstoff M	behandelt mit Borax/Borsäure	8,8	6,3	8,7	49,9
Roggenschüttung W1	Ausgleichsschüttung aus Roggengranulat	12,3	7,3	13,3	47,8[3]
Roggenschüttung W2		12,4	6,6	11,4	53,2[3]
Holzspanschüttung B1	unbehandelt	5,5	7,8	10,5	29,9
Holzspanschüttung B2	behandelt mit Soda	10,0	7,5	10,9	51,4
Holzspanschüttung B3	sonstige Inhaltsstoffe: Molke	8,7	7,6	10,9	38,2
Lehm-Holzfaserschüttung AE	Holzfaserdämmstoff für Schütt- und Einblasdämmung	7,8	7,5	10,3	31,5
Mineralfaserdämmstoffe, anorganische Dämmstoffe – geformt					
Steinwolle-Matte		7,5	nicht messbar		
Glaswolle-Matte		nicht messbar			
Polystyrol-Hartschaumstoff-Platte					

Produktgruppe	Produktbeschreibung	pH-Wert[1]	Ausgleichsfeuchte[2] in [%] nach Lagerung im Klima		
			20/65	23/80	28/>95
Referenzmaterial für die Schimmelpilzprüfungen					
Kiefernsplintholz		4,4	-	-	26,9
Fichte		5,3	-	-	28,3
Buche		5,2	-	-	30,4

[1] Mittelwert aus 3 Einzelwerten

[2] Mittelwert aus 5 Einzelwerten

[3] deutlich höherer mittlerer Feuchtewert vor Gleichgewichtseinstellung erreicht

2.4.1.3 Untersuchung des Feuchteverhaltens

Das Feuchteverhalten von Materialien beeinflusst die Anfälligkeit gegenüber Schimmelpilzen stark. Zur Charakterisierung dieses Verhaltens der Prüfmaterialien wurde deren Ausgleichsfeuchte nach DIN 52183:1977 in folgenden Klimaten [Temperatur in °C, rel. Luftfeuchte in %] ermittelt:

20/65: Prüfklima für Holz, Holzwerkstoffe, Baustoffe

23/80: Prüfklima für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

28/>95: Prüfklima für Schimmelpilzprüfungen.

Die Bestimmung der Ausgleichsfeuchten erfolgte durch Lagerung von je 5 Prüfkörpern in Klimakammern bis zur Massekonstanz (m_f). Anschließend wurde die Trockenmasse m_{tr} bei 70 °C bestimmt und mit $u = (m_f-m_{tr})/m_{tr}$ die Ausgleichsfeuchte bestimmt (Ergebnisse siehe Tabelle 30).
Hinweis: Die Berechnung der Dämmstofffeuchten erfolgte analog zur Holzfeuchte mit Bezug der Masse des Wassers auf die Trockenmasse des Materials. Damit ergeben sich ggf. höhere Werte (bis über 100 % möglich) als bei Bezug zur Masse des feuchten Materials.

Die Ausgleichsfeuchte der verschiedenen Materialien zeigte insbesondere bei dem bisher üblichen Klima für Schimmelpilzprüfungen große Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien. Besonders gravierend war die Feuchteaufnahme bei den Produkten aus Seegras (aufgrund des Salzgehaltes) und Flachs. Das Prüfklima 28/>95 und die entsprechenden Materialfeuchten stellen den Extremfall dar, sind jedoch nicht repräsentativ für übliche baupraktische Bedingungen des Dämmstoffeinsatzes im Normalfall (mit Ausnahme z. B. von Feuchte- oder Wasserschäden).

Für ausgewählte Dämmstoffe wurde zusätzlich der zeitliche Verlauf der Materialauffeuchtung über 28 Tage bei 70 %, 80 %, 90 % und >95 % relativer Luftfeuchte und jeweils 28 °C bestimmt (Bild 55 und Bild 56).

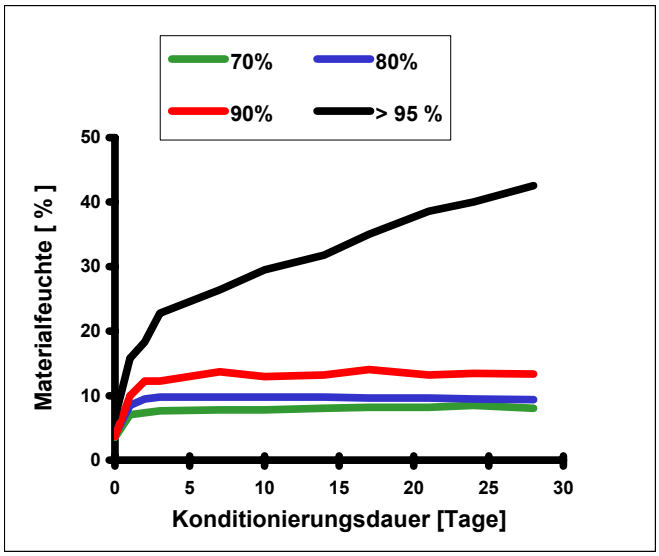


Bild 55: Auffeuchtung von Cellulose-Einblasdämmstoff bei verschiedenen Luftfeuchten

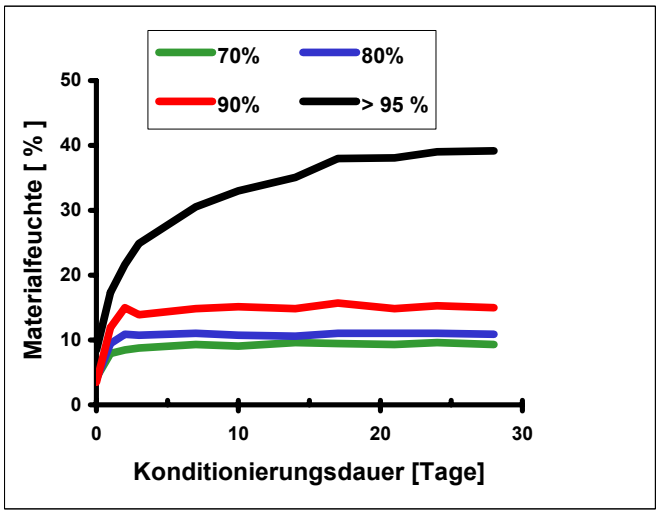


Bild 56: Auffeuchtung der Holzspanschüttung bei verschiedenen Luftfeuchten

Die erhaltenen Kurven verdeutlichen die sprunghafte Erhöhung der Feuchteaufnahme der Materialien bei > 95 % rel. Luftfeuchte (übliche Prüfbedingungen) gegenüber einer Luftfeuchte von 90 %. Demgegenüber sind die Unterschiede zwischen 70 %, 80 % und 90 % rel. Luftfeuchte in der Feuchteaufnahme und Ausgleichsfeuchte sehr gering.

Die Auffeuchtung weiterer Materialien unter den für die Schimmelpilzprüfung üblicherweise eingesetzten Prüfbedingungen (28/>95) ist in Anlage 2 dargestellt. Es wurde erwartet, dass Dämmstoffe mit einer hohen Ausgleichsfeuchte, wie die Flachs- und Seegrasprodukte sowie die Celluloseplatte, eine geringere Schimmelpilzbeständigkeit aufweisen als vergleichbare Materialien mit niedrigeren Ausgleichsfeuchten.

2.4.1.4 Analyse fungizider Additive

An ausgewählten Dämmstoffen wurden die als Brandschutzmittel oder Fungizid eingebrachten Bor-Verbindungen analysiert. Dabei kam u.a. ein qualitativer Schnelltest zur Anwendung. Dieser ermöglicht in der Praxis einen relativ unkomplizierten Nachweis von Boraten in Dämmstoffen.

Farbtest zum Nachweis von Bor und Borverbindungen

- Reagenz I: 90 mL dest. Wasser, 10 mL Salzsäure (36 %)
- Reagenz II: 100 mL Curcuma-Tinktur, 10 g Salicylsäure
- Erst Reagenz I, dann II auf trockenen Dämmstoff auftragen, 10 min Trockenschrank bei 70 °C
- Positive Farbreaktion: orangerot bis ziegelrot
- Negative Farbreaktion: gelb
- Störungen des Tests durch feuchtes Material und Chromate möglich

Der Farbtest konnte an den Flachsdämmplatten erfolgreich zur Unterscheidung behandelter und unbehandelter Produkte eingesetzt werden. Dabei wurden an jeweils 10 Einzelproben der behandelten Materialien identische Farbreaktionen festgestellt, was auf eine gleichmäßige Verteilung der Borate in den Dämmstoffen hindeutet. Auch an Holz, für das dieser Farbtest ursprünglich entwickelt wurde, war ein Nachweis von Borverbindungen problemlos möglich (Bild 57).

Leider erbrachte der Test aber keine eindeutigen Befunde bei borsalzbehandelten Cellulosedämmstoffen im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsprodukt. Dies ist vermutlich auf den Borgehalt des eingesetzten Rohmaterials auf Basis von Altpapier zurückzuführen.

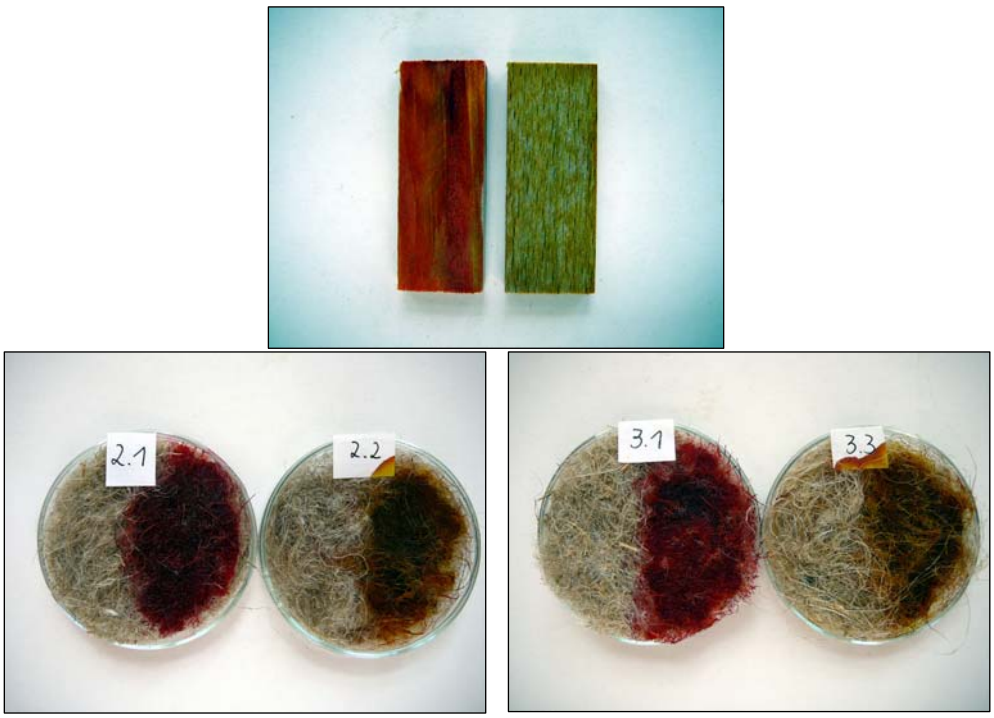


Bild 57: Qualitativer Nachweis von Borverbindungen: Positive Farbreaktion – Rot, Negative Farbreaktion - gelb; oben: mit Borsäure behandeltes und unbehandeltes Holz; unten links: mit Borsalz behandelte Flachsmatte K und unbehandelter Flachs-Rohstoff K; unten rechts: mit Borsalz behandelte Flachsmatte G1 und unbehandeltes Flachs-Polyester-Rohmaterial G

Des Weiteren wurde der Borsalzgehalt der Flachsmatte G1, der Cellulose-platte M sowie des Cellulose-Einblasdämmstoffes Q vor und nach einer Alterungsbeanspruchung bzw. Belastungssimulation durch einen Rütteltest (vgl. Pkt. 2.4.3.1) chemisch analysiert (Tabelle 31). Die Bestimmung der Boratkonzentration erfolgte nach IHD-W 447, welcher auf einer Extraktion mit Mannitol nach Peylo 1993 beruht.

Die Proben wurden mittels Labormühle zerkleinert. Von den zerkleinerten Proben wurden jeweils 2 x ca. 0,5 g bis 2 g eingewogen, mit 40 mL Extraktionslösung (10 %ige Mannitollösung) versetzt, 30 min im Ultraschallbad behandelt und über Nacht auf der Schüttelmaschine extrahiert. Danach wurde erneut für 30 min im Ultraschallbad behandelt. Der Borgehalt wurde anschließend titrimetrisch bestimmt. Jeweils 5 mL oder 10 mL wurden in Erlenmeyerkolben vorgelegt und mit 0,01 N NaOH gegen Phenolphthalein titriert. Es wurde ein Blindwert als Doppelbestimmung ermittelt und von den titrimetrischen Werten abgezogen. Die Nachweisgrenze dieser Analysemethode liegt nach Peylo (1993) bei 15 mg/kg.

Tabelle 31: Bestimmung des Borsalzgehaltes ausgewählter Dämmstoffe

Prüfmaterial	$[H_3BO_3]$ in [g/kg]	$[H_3BO_3]$ in [%]
Flachsmatte G1	32,2	3,22
	46,3	4,63
	38,2	3,82
	32,3	3,23
	42,5	4,25
Celluloseplatte M	66,1	6,61
	69,0	6,90
	67,9	6,79
	58,4	5,84
	86,7	8,67
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	24,8	2,48
	15,6	1,56
	15,0	1,50
	16,9	1,69
	19,1	1,91
Cellulose-Einblasdämmstoff Q nach Rütteltest	15,0	1,50
	16,6	1,66
	18,6	1,50
	18,9	1,68
	15,8	1,75

Dabei wurden an 5 Einzelproben je Material keine signifikanten Konzentrationsunterschiede der Borate gefunden. Dies bestätigte die Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen an den Flachsmatten. Auch die mechanische Belastung durch den Rütteltest am Einblasdämmstoff Q führte nicht zu einer signifikanten Veränderung des analysierten Borsalzgehaltes.

2.4.2 Methodenentwicklung

Das grundlegende Prüfprinzip ist bei allen Verfahren der Schimmelpilzprüfung ähnlich: Unbeimpfte oder gezielt mit Schimmelpilzsporen beimpfte Proben werden unter Bedingungen, die das Wachstum und die Entwicklung von Schimmelpilzen fördern, bebrütet. Nach einer definierten Inkubationszeit wird das Ausmaß des Schimmelpilzbewuchses nach einem Bonitierungsschema bewertet.

Die einzelnen Prüfvorschriften variieren jedoch z. B. hinsichtlich der eingesetzten Prüfpilze, der Art der Sporengewinnung und Beimpfung, der Bebrütungsdauer, der Prüfklimate sowie der Bonitierungsvorgaben. Im Vorfeld der Methodenentwicklung wurden verschiedene Norm- und Prüfverfahren zur Bestimmung der Schimmelpilzresistenz von Materialien unter Vergleich der wesentlichen Prüfparameter zusammengestellt (vgl. Anlage 1).

Die Einsetzbarkeit dieser Verfahren bzw. ausgewählter Arbeitsschritte, Prüfparameter oder methodischer Ansätze für die Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen wurden geprüft. Das IHD-Teilvorhaben beinhaltete daher experimentelle Untersuchungen zu folgenden Variablen:

- Auswahl geeigneter Prüfpilze,
- Bestimmung der Beimpfungskonzentration,
- Variation des Prüfklimas,
- Einfluss von Nährstoffzusätzen.

Im Ergebnis der Untersuchung der Dämmstoffe nach derzeit eingesetzten Methoden (DIN EN 60068-2-10 und ÖNORM 6010, Ergebnisse unter 2.4.4) sowie der Auswertung von Prüfvorschriften für andere Produkte wurden zudem obligatorische Prüfbedingungen bzw. Arbeitsschritte festgelegt. Dies betrifft

- die Prüfvarianten,
- die Herstellung der Sporensuspension,
- die Prüfkörpervorbereitung und Prüfanordnung sowie
- die Kontrolle des Prüfablaufs.

Weiterhin wurde ein für Dämmstoffe geeignetes Bonitierungssystem etabliert und eine praxisbezogene Interpretation der Prüfbefunde in Form eines Klassifizierungssystems vorgeschlagen.

Die entwickelte Prüfmethode wurde in Form einer IHD-Verfahrensanweisung dokumentiert (Anlage 5, IHD VA 20-24/1).

2.4.2.1 Prüfvarianten

Obligatorische Prüfvarianten:

Für die Prüfung von Dämmstoffen werden zwei obligatorische Prüfvarianten festgelegt. Eine Prüfvariante erfolgt mit Beimpfung. Dazu wird eine definierte Mischsuspension von Prüfpilzen auf das Untersuchungsmaterial gebracht. In einer zweiten Prüfvariante wird das Material ohne Beimpfung eingesetzt, wobei eine Entwicklung der natürlicherweise im Untersuchungsmaterial und in der Umgebung auftretenden Schimmelpilze erfolgt. Die Festlegung wurde im Ergebnis der Prüfung der Dämmstoffe nach DIN EN 60068-2-10 und ÖNORM 6010 getroffen, bei denen mit und ohne Beimpfung unterschiedliche Prüfbefunde erzielt wurden (vgl. 2.4.3.1).

Optionale Prüfvariante:

Eine optionale Prüfvariante beinhaltet den Zusatz von Nährstoffen (vgl. 2.4.2.7). Diese verschärfte Prüfung kann sinnvoll sein, wenn z. B. die Wirksamkeit eines Fungizids in einem Werkstoff bzw. Material nachgewiesen werden soll.

Alterungsbeanspruchung:

Eine Alterungsbeanspruchung im Vorfeld einer biologischen Prüfung muss je nach Art und Einsatzbereich der zu prüfenden Materialien festgelegt werden. Bei losen Dämmstoffen wird vorgeschlagen, eine mechanische Beanspruchung durch Simulierung des Einbaus (Aufschütten, Einblasen mit Blasmaschine) und Vibration (Rütteltest analog der Bestimmung des Setzmaßes bei Erschütterung) vorzuschalten. Dies erfolgt auf effiziente Weise, wenn z. B. das Probematerial für die biologische Prüfung von der Probemenge nach der Bestimmung des Setzmaßes entnommen wird.

Grundsätzlich ist bei Berücksichtigung einer Alterungsbeanspruchung die jeweilige Prüfvariante auch mit nicht gealtertem Prüfmaterial durchzuführen. Hieraus können Rückschlüsse gezogen werden, welchen Einfluss z. B. eine mechanische Beanspruchung auf die stoffliche Zusammensetzung hat.

2.4.2.2 Prüfpilze

2.4.2.2.1 Vorauswahl

Die Vorauswahl der Prüfpilze erfolgte unter Berücksichtigung sowohl der am häufigsten in genormten Verfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien genannten Pilzarten, der in der Prüfserie Selbstinfektion (ÖNORM 6010 mit Bonitierung gemäß EN ISO 846) identifizierten Pilzarten, von Literaturangaben zu Verbreitung, Ansprüchen und Kultivierbarkeit von Schimmelpilzen (u.a. Samson et al. 1996, E DIN 4108) als auch eigenen Untersuchungen zum Auftreten von Schimmelpilzen auf Holzwerkstoffen und in Gebäuden (Kruse et al. 2004, Weiß et al. 2004/2005, Scheiding et al. 2006).

Folgende Pilze (Stämme in []) wurden ausgewählt:

- *Aspergillus niger* van Tieghem [DSM 1957]
- *Chaetomium globosum* Kunze: Fries [BAM-ATCC 6205]
- *Cladosporium cladosporioides* (Fres.) de Fries [IHD-3.RV]
- *Cladosporium herbarum* (Pers.) Link [DSM 63 422]
- *Eurotium herbariorum* (Wiggers) Link ex Gray; [IHD-6.RV]
- *Eurotium rubrum* (König, Spiekermann & Bremer) [DSM 62631]
- *Penicillium funiculosum* Thom [DSM 1944]
- *Penicillium chrysogenum* Thom [DSM 4154]
- *Penicillium expansum* ; [IHD-4.RV]
- *Paecilomyces variotii* Bainier [DSM 1961]
- *Trichoderma viride* (Syn.: Gliocladium virens, Trichoderma virens) (Miller et al.) von Arx [Hainsberg]
- *Trichothecium roseum* (Pers.) Link [IHD-6.RV]

Angaben zu Auswahlkriterien und aus der Literatur bekannten Wachstumsansprüchen der einzelnen Pilze erfolgen in Anlage 3.

2.4.2.2.2 Wachstum und Entwicklung

Die für die Untersuchungen einzusetzenden Pilzstämme wurden von der Deutschen Stammsammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen (DSMZ) oder im Rahmen von Ringversuchen zur Schimmelpilzdiagnostik vom Landesgesundheitsamt (LGA) Baden-Württemberg bezogen.

Die Stammhaltung der Kulturen erfolgte durch Anzucht auf 5 %igem Malzextraktagar bzw. 5 %igem Saccharoseagar (7- bis 14tägige Inkubation bei 24 bis 28 °C und ca. 70 % rel. Luftfeuchte) und anschließende Kühllagerung bei 4 °C. Die Kulturen wurden halbjährlich überimpft. Vor Verwendung in den Laborversuchen wurde die Physiologie aller Stämme überprüft, um Degenerationserscheinungen (z. B. ausgeprägte Luftmyzelbildung, unzureichende Sporenbildung) auszuschließen.

Die Wachstumsintensität der vorausgewählten Prüfpilze in Reinkultur wurde bei 23 °C und 28 °C auf Malzextraktagar (MEA) bzw. Saccharoseagar (*Eurotium*-spp.), auf Filterpapier und Vollholz sowie auf Flachs-Rohmaterial, Cellulose-Rohmaterial und Holzweichfaserplatte vergleichend untersucht. Dabei sollte festgestellt werden, ob die Pilze ein hinreichendes Wachstum auf verschiedenen Dämmstoffen und Vergleichsmaterialien bei beiden Prüftemperaturen zeigen und sich damit prinzipiell als Prüfpilze eignen.

Dazu wurden die unterschiedlichen Materialien sterilisiert, mit den Pilzen in Reinkultur beimpft und bebrütet. Neben der Wachstumsgeschwindigkeit und Wachstumsintensität wurde die Erkennbarkeit der Pilze auf den Materialien unterschiedlicher Struktur und Farbe bewertet (Tabelle 32).

Tabelle 32: Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Materialien

Pilzart	Entwicklung auf Malzextraktagar[1]		Bewertung[2] auf verschiedenen Substraten[3] bei 28 °C nach 4 Wochen				
	23 °C	28 °C	I	II	III	IV	V
A. niger van Tieghem	ca. 28 / 3	ca. 34 / 3	3	3	2	2	2
C. globosum Kunze: Fries	ca. 30 / 7	ca. 40 / 4	3	3	2	2*	1
C. cladosporioides (Fres.) de Fries	ca. 12 / 3	ca. 10 / 3	3	1	0	2*	1*
C. herbarum (Pers.) Link;	ca. 12 / 3	ca. 8 / 3	3	1	0	3*	1*
E. herbariorum Link,	ca. 22 / 3	ca. 35 / 3	3	3	1	3*	1
E. rubrum,	ca. 20 / 3	ca. 35 / 3	3	1	1	1	3
P. funiculosum Thom	ca. 10 / 3	ca. 13 / 3	3	2	2	3	3
P. chrysogenum Thom	n.m. / 3	ca. 13 / 3	3	2	2	1*	1
P. expansum	ca. 10 / 3	ca. 5 / 3	3	0	1	2*	3
Paecilomyces variotii Bainier	ca. 12 / 3	ca. 22 / 3	3	3	2	3	2
T. viride von Arx,	ca. 38 / 3	ca. 41 / 3	3	3	2	2	2
T. roseum (Pers.) Link	ca. 14 / 3	ca. 10 / 3	3	0	0	3	0

[1]) Kolonie-Zuwachs in 5 Tagen in mm / Beginn der Sporulation nach x Tagen

[2]) Bonitierungsstufen (nach DIN IEC 60 068-2-10)
0 kein Wachstum
1 Wachstum bei 50-facher Vergrößerung erkennbar
2 Wachstum auf weniger als 25 % der Fläche
3 Wachstum auf mehr als 25 % der Fläche
* Fremdinfektion

[3]) Substrate
I...Filterpapier, II…Vollholz Buche, III...Holzweichfaserplatte, IV...Flachs-Rohmaterial, IV...Cellulose-Rohmaterial

Die Pilze entwickelten sich in relativ kurzer Zeit bei beiden Temperaturen gut, jedoch wurden deutliche Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit und bei der Sporulation festgestellt (Tabelle 32). Damit in Zusammenhang stand eine unterschiedliche Erkennbarkeit, insbesondere infolge der Bildung von gefärbten Sporen (vgl. Anlage 4). Mit Ausnahme von *P. expansum, P. chrysogenum, C. cladosporioides, C. herbarum* und *T. roseum* wuchsen die Pilze bei 28 °C schneller und sporulierten intensiver als bei 23 °C. Es zeigte sich zudem, dass die Prüfpilze nicht auf allen Materialien gleich stark wachsen (Tabelle 32). Daneben wurden erneut Unzulänglichkeiten des Bonitierungsschlüssels aufgezeigt. So blieb beispielsweise unklar, ob ein großflächiger Bewuchs, der nur mikroskopisch erkennbar war, mit einer besseren Bonitierungsstufe bewertet werden darf (1) als ein punktueller, jedoch makroskopisch deutlich erkennbarer Bewuchs (2).

Nur wenige Pilze wuchsen auf allen Materialien gut bis sehr gut (*A. niger, P. funiculosum, T. viride* und *P. variotii*). Dieser Befund zeigt zudem, dass ein Gemisch verschiedener Pilze eingesetzt werden muss, um eine Breite verschiedener Materialien hinsichtlich der Schimmelpilzbeständigkeit charakterisieren zu können.

Im Bezug auf die für die Bonitierung des Prüfergebnisses erforderliche visuelle Bewertung des Pilzwachstums auf den Prüfoberflächen sind die untersuchten Pilze differenziert zu bewerten (Anlage 4). Besonders vorteilhaft sind dabei Kulturen, die makroskopisch einfach erkennbare Myzelstrukturen ausbilden (z. B. Perithezien bei *Chaetomium globosum*) oder eine leicht wahrnehmbare Myzel- oder Sporenfärbung aufweisen (z. B. schwarzer „Pilzrasen" bei *A. niger* oder leuchtend gelbe Cleistothezien bei *E. herbariorum*).

Neben dem Wachstum wurden das Handling und die Effizienz der Herstellung einer Sporensuspension der Pilze untersucht (Anlage 4). Dazu wurden die Sporen eines Kultivierungsröhrchens unter Gewährleistung gleicher Aufarbeitungsschritte in jeweils 50 mL Flüssigkeit aufgenommen. Es wurden sehr unterschiedliche Sporenkonzentrationen für die verschiedenen Pilzarten ermittelt. Die Werte lagen dabei zwischen $2{,}4\times10^5$ (*T. roseum*) und $6{,}7\times10^7$ (*P. funiculosum*) Sporen/ml. Daraus wird deutlich, dass zur Gewährleistung gleicher Sporenanteile bei Einsatz gemischter Sporensuspensionen eine Sporenzählung unumgänglich ist.

Als schwierig erwies sich die im Rahmen der Herstellung der Sporensuspension erforderliche Zentrifugation der Kulturen bei 5.000 min^{-1}. Die Sporen einiger Pilzarten sedimentierten weniger gut, vor allem von *E. herbariorum*. Die Sporen von *C. herbarum* und *T. roseum* konnten mit herkömmlichen Methoden gar nicht abzentrifugiert werden.

Die Stabilität der einzelnen Sporensuspensionen der Prüfpilze bei Kühlschrank- und Frostlagerung wurde überprüft. Dazu wurden sie bis zu 40 Wochen im Frost (-20 °C) und 12 Wochen im Kühlschrank (4 °C) gelagert und anschließend die Lebendkeimzahl ermittelt. Dazu wurden geeignete Verdünnungsstufen der Suspensionen auf MEA ausplattiert. Die Anzahl der koloniebildenden Einheiten (KBE) nach 3 und 6 Tagen wurde bestimmt. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Pilze mit Ausnahme von *C. herbarum* nach Frostlagerung keine signifikanten Aktivitätsverluste aufwiesen. Bei längerer Kühlschranklagerung hingegen (> 7 Tage) kam es zum Auskeimen der Sporen, so dass eine Weiterverwendung der Suspension eine erneute Filtration und Sporenzählung erforderlich machte.

2.4.2.2.3 Festlegung der Prüfpilze

Im Ergebnis der experimentellen Untersuchungen wurden Pilzarten ermittelt, welche die Prüfanforderungen in besonders hohem Maße erfüllen:

- hohe Wachstumsgeschwindigkeit und -intensität unter Prüfbedingungen
- gutes bis sehr gutes Wachstum auf unterschiedlichen Materialien (Bonitierungsstufe 2 bis 3 in Tabelle 4)
- hohe Sporenkonzentration
- einfaches Handling bei der Herstellung der Sporensuspension

Folgende Prüfpilze erfüllten dabei die Prüfanforderungen in hohem Maße (Bild 58):

- *Aspergillus niger*
- *Trichoderma viride*
- *Penicillium funiculosum*
- *Paecilomyces variotii*
- *Chaetomium globosum*

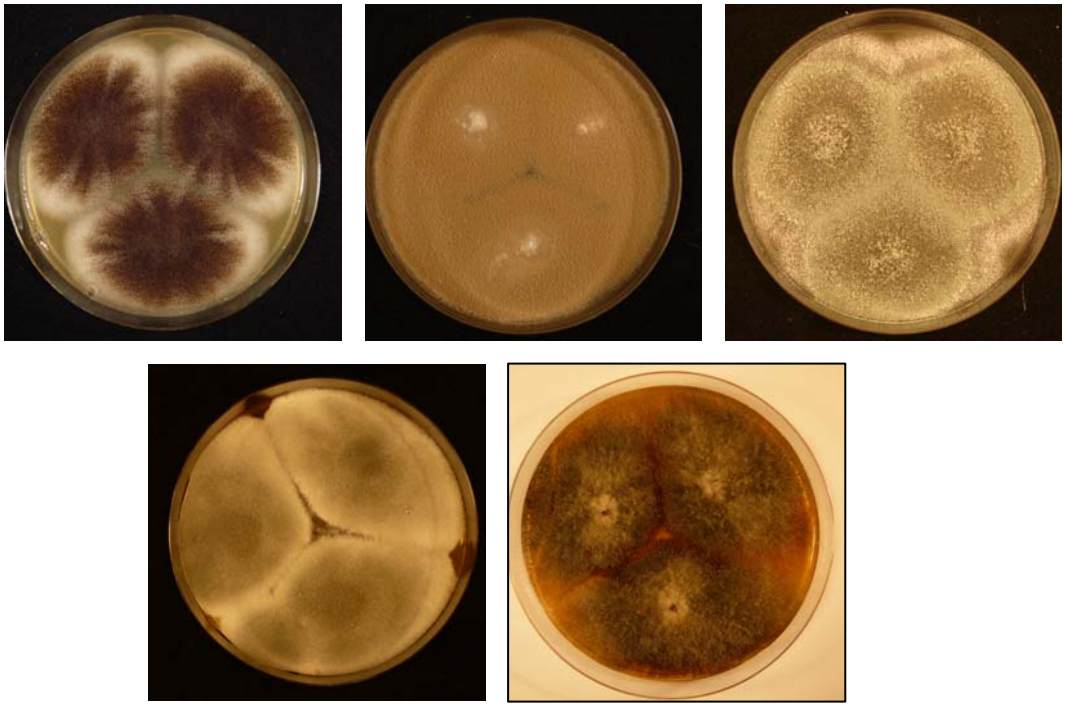


Bild 58: Prüfpilze für die Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen; oben: *Aspergillus niger*, *Paecilomyces variotii*, *Trichoderma viride* , unten: *Chaetomium globosum* und *Penicillium funiculosum*

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Prüfpilzen wurden diese auf MEA-Platten, sterilisiertem Filterpapier und Kiefernsplintholz angezüchtet. Die Beimpfung erfolgte mit einer zu gleichen Teilen gemischten Sporensuspension. Die Einzelsuspensionen wurden dazu vorher auf eine Sporenkonzentration von 10^6 Sporen/ml verdünnt. Nach Inkubation bei 28 °C wurde die Auskeimung der einzelnen Prüfpilze nach 3 und 7 Tagen bewertet (Tabelle 33).

Tabelle 33: Wechselwirkung der Prüfpilze (Beimpfung mit Sporen-Mischsuspension)

Prüfpilz	Sichtbares Wachstum auf den Substraten[1]		
	MEA	Filterpapier	Kiefer Splint
A. niger	+++	+++	+++
T. viride	+	++	+
P. funiculosum	++	++	++
P. variotii	+++	+++	+++
C. globosum	+	+	+

[1] Bonitierung: + schwach, ++ deutlich sichtbar, +++ sehr kräftig

2.4.2.3 Prüfkörpervorbereitung und Prüfanordnung

Das zu prüfende Material muss eine repräsentative Mischprobe des zu untersuchenden Dämmstoffs darstellen. Das Material wird vor Verwendung nicht sterilisiert. Für jede Prüfvariante (vgl. 2.4.2.1) sind mindestens 3 Prüfkörper (PK) des zu untersuchenden Materials einzusetzen.

Prüfkörper geformter Dämmstoffe, wie Platten, Matten oder Filzen, werden im Format 50×50 mm² hergestellt. Bei sehr dicken Materialien, z. B. Fasermatten, werden von der für die Prüfung relevanten Dämmstoffoberfläche PK mit mindestens 20 mm Dicke entnommen. Die Dichte der PK soll der Dichte im Einbauzustand entsprechen.

Prüfkörper von losen Dämmstoffen werden durch Einfüllen in perforierte inerte Gefäße, wie z. B. PP-Becher, mit ca. 50×50 mm² Prüf-Oberfläche hergestellt. Die Dichte der PK muss der Soll-Dichte im Einbauzustand entsprechen. Dazu ist die Einwaage zu berechnen, die erforderlich ist, um mindestens 20 mm dicke PK herzustellen. Das lose Material ist nach dem Einfüllen entsprechend mit einem Stempel o.ä. leicht zu verdichten und dabei zu egalisieren, wodurch gleichzeitig eine bessere Bewertbarkeit ermöglicht wird.

Die Prüfkörper und Kontrollprüfkörper werden nach Beimpfung auf inerten Abstandshaltern in Prüfgefäße eingebracht, deren Boden etwa 2 cm hoch mit Leitungswasser bedeckt ist. Als Prüfgefäße sind z. B. PE-Schalen oder Glasgefäße mit Deckel geeignet. Es können mehrere Prüfkörper in ein Prüfgefäß verbracht werden. Allerdings sind für beimpfte und unbeimpfte Prüfkörper separate Gefäße vorzusehen und die einzelnen Parallelproben eines Produktes auf verschiedene Prüfgefäße zu verteilen.

Die oben aufgeführten Prüfkörperabmessungen wurden aufgrund der verwendeten Versuchsgefäße gewählt. Kleinere Prüfkörper sollten aufgrund der benötigten Probenoberfläche für die visuelle Bewertung des Pilzwachstums nicht eingesetzt werden. Gegen größere Proben ist bei Vorhandensein entsprechender Prüfgefäße nichts einzuwenden.

2.4.2.4 Herstellung der Sporensuspension

Zur Herstellung der Sporen-Mischsuspension aller Prüfpilze werden diese als Reinkultur auf Schrägagarröhrchen (5 %iger Malzextraktagar) im Brutschrank bei 28 °C über einen Zeitraum von 14 bis 28 Tagen angezogen. Für die Sporengewinnung sind ausschließlich frische Kulturen mit arttypischem Wachstum (Myzelfärbung, Sporulierung) zu verwenden.

Die Herstellung der Sporensuspension erfolgt unter sterilen Bedingungen. Jeder Pilzkultur (Schrägagarkultur) werden 10 mL von mit 0,05 % Dioctyl-Natriumsulfosuccinat oder Lauryl-Natriumsulfat als Netzmittel versetztem sterilen dest. Wasser zugegeben. Mit einer Impföse oder -nadel wird zur Abtrennung der Sporen vorsichtig über der Oberfläche des Pilzrasens gestrichen. Um die Sporen in eine wässrige Phase zu überführen, ohne dabei Nährbodenanteile und Myzelteilchen abzulösen, wird die Flüssigkeit vorsichtig geschüttelt und dann in einen 300-ml-Erlenmeyerkolben mit Wattestopfen oder ein anderes geeignetes Gefäß dekantiert. Die Einzelsuspensionen werden kräftig geschüttelt und dann über schnell laufendes Filterpapier filtriert, um Myzel und Nährbodenteilchen sowie Sporenklumpen abzutrennen.

Die Sporen der filtrierten Suspensionen werden in Zentrifugenröhrchen abzentrifugiert (10 min bei 5.000 min^{-1}) und die überstehende Flüssigkeit verworfen. Der Rückstand wird in destilliertem Wasser mit Netzmittel aufgenommen und erneut zentrifugiert. Der nach dem Waschen erhaltene Rückstand wird in steriler 0,9 %iger physiologischer Kochsalzlösung aufgenommen (50 mL je Schrägagarkultur). Die Einzelsuspensionen wurden nach Bestimmung der Ausgangskonzentration mittels Thoma-Zählkammer auf $1*10^6$ bis $5*10^6$ Sporen je mL verdünnt und im gleichen Verhältnis gemischt.

2.4.2.5 Beimpfung

Die Beimpfung erfolgte im Rahmen des Projektes durch Aufsprühen der Sporensuspension mit einem Labor-Feinzerstäuber „Bistabil“ oder durch Vernebelung mit einem Ultraschall-Aerosol-Gerät (Bild 59).

Bild 59: Ultraschall-Aerosol-Gerät mit Sicherheits-Impfbox

Zur Festlegung der Beimpfungskonzentration (Anzahl der aufzubringenden Sporen je Flächeneinheit des Prüfmaterials) wurden verschiedene sterilisierte Materialien mit Sporensuspensionen unterschiedlicher Konzentrationen beimpft und 28 Tage bei 28 °C inkubiert.

Bei der Beimpfung wurden jeweils ca. 1 µl Sporensuspension je cm² Probenoberfläche aufgebracht. Die Probenoberflächen betrugen bei MEA-Platten ca. 65 cm², bei Filterpapier 100 cm² und bei Kiefernsplintholz 12,5 cm². Die Konzentration der eingesetzten Sporensuspension wurde zwischen 10^4 und 10^7 Sporen je mL variiert (Tabelle 34).

Tabelle 34: Variation der Beimpfungskonzentration

Konzentration der Sporenlösung [ml^{-1}]	Bewertung des Wachstums[1]					
	nach 7 Tagen			nach 28 Tagen		
	MEA	Filterpapier	KI-Splint	MEA	Filterpapier	KI-Splint
10^4	3	0	0	3	2-3	2
10^5	3	1	0-1	3	3	3
10^6	3	1-2	1	3	3	3
10^7	3	2	2	3	3	3

[1] Bonitierung siehe Tabelle 32

Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Beimpfungskonzentration auf das Prüfergebnis nach 28tägiger Inkubation relativ gering ist. Ein zunächst aufgrund der niedrigeren Beimpfungskonzentration auftretendes verzögertes Schimmelpilzwachstum wird bei hinreichend langen Prüfzeiträumen ausgeglichen. Damit kann die Wachstumsverzögerung in einem bestimmten Konzentrationsbereich der Sporensuspension (10^5 bis 10^7 Sporen je mL) vernachlässigt werden.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurden für die entwickelte Prüfmethode eine Sporenkonzentration von 10^6 Sporen je mL und eine Beimpfungskonzentration von 1 µl/cm² Probenoberfläche festgelegt. Damit werden ca. 1.000 Sporen je cm² Probenoberfläche aufgebracht.

In der Praxis ist die Gewährleistung der Beimpfungskonzentration schwierig umzusetzen. Die Vorgehensweise zur Aufbringung der geforderten Sporenanzahl muss für jedes verwendete Beimpfungsgerät in Vorversuchen ermittelt werden (z. B. Anzahl Sprühstöße mit der Feinstrahl-Sprühflasche oder Expositionszeit im Ultraschall-Aerosol-Gerät).

2.4.2.6 Prüfklima

Da die hohe Feuchtebeanspruchung bei >95 % relativer Luftfeuchte die tatsächlichen praktischen Gegebenheiten nicht widerspiegelt, wurden experimentelle Untersuchungen zur Reduzierung der Prüffeuchte durchgeführt.

So entstand die Idee, für die Schimmelpilzprüfung das Prüfklima [23/80] zu verwenden, welches für die Bestimmung des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit nach DIN V 4108-10 vorgeschrieben ist.

Tabelle 35 zeigt die Abhängigkeit des Schimmelpilzwachstums auf ausgewählten Dämmstoffen von unterschiedlichen relativen Luftfeuchten. Es wurde nachgewiesen, dass bei 70 % und 80 % kein hinreichendes Schimmelpilzwachstum innerhalb eines vertretbaren Prüfzeitraumes von 4 Wochen erfolgt. Obwohl bei 90 % rel. Luftfeuchte unbeständige Materialien bereits bewachsen werden, wird die beste Differenzierung der Dämmstoffe erst bei >95 % erreicht.

Tabelle 35: Bewertung des Schimmelpilzwachstums in Abhängigkeit von der Prüffeuchte (Inkubation bei 28 °C, 4 Wochen)

Produktgruppe	**Bewertung[1] des Pilzwachstums bei verschiedenen relativen Luftfeuchten (mit/ohne Beimpfung)**			
	70 %	**80 %**	**90 %**	**>95 %**
Flachsmatte G1	0/0	0/0	1-2/1-2	2/1
Holzspanschüttung B2	0/0	0/0	0/1	1/1
Holzfaserplatte AF1	0/0	0/0	1-2/2	3/3
Celluloseschüttung Q	0/0	0/0	0/0	0/0
Cellulose-Rohmaterial Q	0/0	0/0	0/0	0/0
Roggenschüttung W1	0/0	0/0	3/3	3/3
Lehm-Holzfaserschüttung AE	0/0	1/1-2	1-2/1-2	3/3
Referenz: Buchenholz	0/0	0/0	0-1/2-3	3/3

[1] Bonitierung siehe Tabelle 32

Wie die Tabelle 35 zeigt, hat das Prüfklima einen entscheidenden Einfluss auf das Prüfergebnis und damit die Bewertung und Klassifizierung eines Dämmstoffes.

Aus prüftechnischer Sicht ist eine relative Luftfeuchte von >95 % zu favorisieren. Dies entspräche auch der üblichen Vorgehensweise anderer Laborprüfungen, z. B. zur Bestimmung der Wirksamkeit von Bioziden oder zur Bestimmung der Materialbeständigkeit gegen Mikroorganismen, die unter Worst-case-Bedingungen erfolgen. Als Beispiel seien hier die EN 113 zur Bestimmung der Holzschutzmittelwirksamkeit und der CEN/TS 15083 zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holz genannt. Bei Prüfung in einem milderen Prüfklima kann bei angemessener Prüfdauer nur eine ungenügende Differenzierung vorgenommen werden.

Demgegenüber steht die tatsächliche praktische Belastung der Dämmstoffe. In ordnungsgemäß geplanten und ausgeführten Konstruktionen sollten sich keine extremen Luftfeuchten von über 95 % einstellen. Das für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit vorgeschriebene Prüfklima 23/80 trägt den zulässigen höheren Baustofffeuchten bereits Rechnung.

Die Prüfung nach beiden Klimata wäre zwar eine denkbare Variante, löst aber nicht das Problem, welches Prüfergebnis letztlich zur Bewertung des Produktes hinsichtlich dieser Eigenschaft heranzuziehen ist. Folgt man dem für biologische Prüfungen üblichen Grundsatz, die Variante mit dem jeweils

ungünstigsten Ergebnis zu berücksichtigen, wäre das mildere Klima 23/80 sofort wieder entbehrlich.

Eine Entscheidung, ob dem prüftechnisch zu bevorzugenden scharfen Klima 28/>95 oder dem praxisnäheren und für die Wärmeleitfähigkeitsmessung eingeführten Klima 23/80 der Vorzug zu geben ist, muss in den entsprechenden Normungsausschüssen (CEN/TC88) bzw. in den Gremien des DIBt gemeinsam mit den Dämmstoffherstellern getroffen werden. Die Diskussion hierzu sollte bereits im Rahmen der Auswertung des FNR-Verbund-vorhabens geführt werden.

2.4.2.7 Nährstoffzusätze

An ausgewählten Materialien wurde der Einfluss eines zusätzlichen Nährstoffeintrags untersucht (Tabelle 36). Dieser simuliert eine in der Praxis mögliche Verschmutzung der Materialien durch für Schimmelpilze verwertbare Substanzen. Dazu wurde die Sporen der Prüfpilze nach dem Waschen und Abzentrifugieren jeweils in 5 %iger Malzextraktlösung bzw. 5 %iger Saccharoselösung aufgenommen und für die Beimpfung eingesetzt.

Erwartungsgemäß führte eine Nährstoffzugabe zu einem verstärkten Pilzwachstum auf allen nicht fungizid ausgerüsteten Materialien. Der Einsatz von Malzextrakt führte dabei zu stärkerem Pilzwachstum als bei Saccharose.

Tabelle 36: Verschärfte Prüfung mit Nährstoffzugabe

Material/Substrat	**Bewertung[1] des Wachstums nach 2 Wochen**		
	Ohne Nährstoffzusatz	5 %ige Malzextraktlösung	5 %ige Saccharoselösung
Filterpapier	++	++++	++++
Vollholz Buche	++	++++	+++
Holzweichfaserplatte AF1	++	++++	+++
Flachs-Rohmaterial K	++	++++	++++
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	-	-	-
Holzspanschüttung B1	-	++	++
Steinwolle	-	+	+

[1] Bonitierung: - kein Wachstum, + schwach, ++ gering, +++ stark, ++++ sehr stark

Die verschärfte Prüfung durch Nährstoffzugabe bietet die Möglichkeit, verschiedene Materialien besser hinsichtlich ihres Verhaltens gegenüber Schimmelpilzen zu differenzieren.

Dabei sind unter bestimmten Voraussetzungen folgende Aussagen möglich:

- Ein nicht fungizid ausgerüstetes Material, dass bereits ohne Nährstoffzusatz bewachsen wird, enthält in der Regel für Schimmelpilze verwertbare Inhaltsstoffe (Tabelle 36: Filterpapier und Buchenholz, Holzweichfaserplatte AF1 und Flachs-Rohmaterial K).
- Ein Material, dass ohne Nährstoffzusatz schimmelpilzbeständig ist, bei Nährstoffzugabe aber bewachsen wird, enthält in der Regel keine für Schimmelpilze verwertbaren Inhaltsstoffe. Gleichzeitig enthält es jedoch auch keine wirksamen fungitoxischen Inhaltsstoffe (z. B. Fungizide). Damit ist im Falle eines Nährstoffeintrags durch Verschmutzung Schimmelpilzentwicklung an den verschmutzten Oberflächen möglich (in Tabelle 36: Holzspanschüttung B1 und Steinwolle).
- Wird ein fungizid ausgerüstetes Material auch mit Nährstoffzugabe nicht von Schimmelpilzen bewachsen, gilt dies in der Regel als Nachweis für die Wirksamkeit des eingebrachten Biozids (Tabelle 36: Cellulose-Einblasdämmstoff Q).

2.4.2.8 Bonitierung/Klassifizierung

Da die Intensität des Pilzwachstums in den Prüfungen nicht immer gleich ist und eine zuverlässige flächenmäßige Abschätzung des Bewuchses auf den Prüfkörpern schwierig ist, wurde die vergleichende Bewertung mit einem geeigneten Vergleichsmaterial eingeführt. Dieses muss unter Prüfbedingungen schnell bewachsen werden und sollte dem zu prüfenden Material ähnlich sein. Dadurch wird der Einfluss des subjektiven Faktors bei der visuellen Bewertung verringert. In Tabelle 37 sind geeignete Vergleichsmaterialien aufgeführt.

Tabelle 37: Prüfmaterialien und geeignete Vergleichsmaterialien

Prüfmaterial	**Vergleichsmaterial**
Holz (massiv)	Buchenholz
Holzwerkstoffe (Partikelwerkstoffe)	MDF*, gebunden mit Harnstoff-Formaldehydharz
Dämmschüttungen (u.a. Späne, Schäben, Holzwolle, Getreidegranulat)	Späne aus Buchenholz
Faserdämmstoffe (u.a. Cellulose)	Buchenfaserstoff

*) Medium density fibreboard; mitteldichte Faserplatte

Auf Grundlage der Projektuntersuchungen und jahrelanger Prüferfahrung mit unterschiedlichen Materialien wurde für Dämmstoffe sowie Holzwerkstoffe ein Bonitierungsschema festgelegt, das nach derzeitigem Kenntnisstand für die Charakterisierung der Schimmelpilzbeständigkeit sehr gut geeignet ist (Tabelle 38). Es beruht auf der vergleichenden Bewertung des Schimmelpilzbewuchses auf dem Prüfmaterial und dem Vergleichsmaterial. Die Bewertung erfolgt nach 28 Tagen Inkubation; Zwischenbewertungen können aufschlussreich sein und eine vergleichende Bewertung der Anfälligkeit verschiedener Materialien ermöglichen.

Tabelle 38: Bewertungsschlüssel nach IHD VA-20-24-1

Bewertung des Schimmelpilzwachstums	Bonitierungs-stufe
kein Schimmelpilzbewuchs auf der Prüfkörperoberfläche bei Betrachtung im Auflichtmikroskop bei 50-facher Vergrößerung	0
Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge nicht oder nur schwer, bei 50-facher Vergrößerung jedoch deutlich zu erkennen	1
Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge deutlich zu erkennen - deutlich schwächer als auf den Vergleichsprüfkörpern	2
Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge deutlich zu erkennen - gleich oder stärker als auf den Vergleichsprüfkörpern	3

Zur Interpretation der Bonitierung wurde folgende Klassifizierung entwickelt:

Tabelle 39: Vorschlag für die Klassifizierung der Schimmelpilzbeständigkeit

Bonitierungsstufe	Klassifizierung	Eignung
0	beständig	ohne Einschränkung
1	beständig	ohne Einschränkung
2	mäßig beständig	mit Auflagen
3	nicht beständig	nicht geeignet

Im Rahmen baurechtlicher Zulassungsverfahren obliegt allerdings die Bewertung der Ergebnisse der Behörde, die eine Zulassung erteilt, z. B. dem DIBt. So wird für eine ETA nach Bauregelliste B Teil1 Anlage 4/8 (2006/1) für einen Dämmstoff gefordert, dass er hinsichtlich des Widerstandes gegenüber Schimmelpilzbefall in Stufe 0 gem. EN ISO 846 eingestuft sein muss. Andernfalls müssen in der ETA sind detaillierte Randbedingungen zur Vermeidung des Schimmelpilzbefalls festgelegt sein.

2.4.3 Vergleichende Schimmelpilzprüfung

2.4.3.1 Prüfung nach bisher eingesetzten Methoden

Die Schimmelpilzprüfung der Dämmstoffe erfolgte zu Beginn der Projektbearbeitung in Anlehnung an die DIN IEC 60 068-2-10:1991. Diese Prüfnorm (ersetzt durch DIN EN 60068-2-10:2006) ist nach bisheriger Praxis maßgebend für die bauaufsichtliche Zulassung von losen Dämmstoffen durch das Deutsche Institut für Bautechnik. Sie ist aus der Elektrotechnik entlehnt (Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von elektronischen Erzeugnissen). Dabei wird das zu prüfende Material ohne vorherige Sterilisation mit einer gemischten Sporensuspension von 8 Schimmelpilzarten (*Aureobasidium pullulans, Penicillium funiculosum, Trichoderma viride, Aspergillus niger, Scopulariopsis brevicaulis, Aspergillus terreus, Penicillium ochrochloron* und *Paecylomyces variotii*) durch Besprühen beimpft. Anschließend erfolgt eine Inkubation unter Bedingungen, die das Auskeimen und Wachsen der

Schimmelpilze fördern (28 °C und >95 % rel. LF). Nach 4 Wochen wird das Schimmelpilzwachstum auf dem Material nach einem festgelegten Bonitierungsschema bewertet (Tabelle 40).

Des Weiteren wurde eine Prüfung nach ÖNORM 6010 mit Bonitierung gemäß EN ISO 846:1997 (Prüfanforderung gemäß ETA-Verfahren) durchgeführt. Diese Prüfung ist nach bisheriger Praxis maßgebend für eine Europäische Technische Zulassung von losen Dämmstoffen (z. B. durch das Deutsche Institut für Bautechnik). Dabei wird das zu prüfende Material ohne vorherige Sterilisation und ohne definierte Beimpfung mit Schimmelpilzsporen unter Bedingungen inkubiert, die das Auskeimen und Wachsen der natürlicherweise auf dem Material und in der Umgebung auftretenden Schimmelpilze fördern (28 °C und >95 % rel. LF). Nach 4 Wochen wird das Schimmelpilzwachstum auf dem Material nach einem festgelegten Bonitierungsschema (EN ISO 846) bewertet (Tabelle 40).

Tabelle 40: Schimmelpilzprüfung nach DIN-EN 60068-2-10 und ÖNORM 6010

Dämmstoff	**Bonitierung der Prüfva-riante[1]**		**Ausgekeimte Pilzarten bei Prüfung nach ÖNORM 6010/EN ISO 846 (ohne Beimpfung)**
	DIN-EN 60068-2-10[2]	**ÖNORM B 6010/ EN ISO 846[3]**	
Schafwollmatte A	0	0	-
Flachsmatte G1	1-2	3	*Acremonium strictum, Cladosporium herbarum*
Flachsmatte G2	2	3	*A. strictum, Paecilomyces variotii, Penicillium funiculosum*
Flachsmatte K	1-2	3	*A. strictum, C. herbarum*
Flachsmatte AG	2-3	5	*Eurotium amstelodami/ Anamorph: Aspergillus vitis,*
Seegrasmatte AG	3	5	*Eurotium amstelodami/ Anamorph: Aspergillus vitis, E. herbariorum / Anamorph A. glaucus, A. penicillioides, Chaetomium globosum, Wallemia sebi*
Celluloseplatte M	1	0-1	*A. strictum*
Holzfaserplatte AF1	2-3	5	*P. variotii, P. funiculosum*
Holzfaserplatte AF2	2-3	4	*Aspergillus niger, P. variotii, P. funiculosum,*
Schafwolle-Rohmaterial A	0	0	-
Flachs-Rohmaterial K	3	5	*Chaetomium globosum, Trichoderma viride*
Flachs/Polyester-Rohmaterial G	3	5	*Alternaria alternata, C. globosum, Trichothecium roseum, Mucor sp.*
Seegras-Rohmaterial AG	3	3	*Alternaria alternata, Eurotium amstelodamie, C. globosum, P. variotii*

Dämmstoff	Bonitierung der Prüfva-riante[1]		Ausgekeimte Pilzarten bei Prüfung nach ÖNORM 6010/EN ISO 846 (ohne Beimpfung)
	DIN-EN 60068-2-10[2]	ÖNORM B 6010/ EN ISO 846[3]	
Cellulose-Rohmaterial Q	0	0-1	*C. herbarum*
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	0	0	-
Cellulose-Einblasdämmstoff M	0	0	-
Roggenschüttung W1	3	1	*Absidia corymbitera, Aspergillus flavus, Scopulariopsis brevicaulis, T. roseum*
Roggenschüttung W2	3	1	*Aspergillus terreus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus flavus, S. brevicaulis, Eurotium sp.*
Holzspanschüttung B1	0	0	-
Holzspanschüttung B2	1	1	*C. herbarum*
Holzspanschüttung B3	1	1	*C. herbarum, Alternaria sp.*
Lehm-Holzfaserschüttung AE	3	4-5	*S. brevicaulis, A. strictum*
Steinwolle	0	0	-
Glaswolle	0	0	-
Polystyrol-Hartschaumstoff	0	0	-
Steinwolle	0	0	-
Kiefernsplintholz	3	4	*P. variotii, P. funiculosum,*
Fichte	1	2-3	*P. variotii, P. funiculosum*
Buche	3	4-5	*Aspergillus versicolor, P. variotii, P. funiculosum*

[1] Mittelwert aus 3 Einzelwerten

[2] Bonitierungsschema nach DIN EN 60 068-2-10:
0 kein Schimmelpilzwachstum bei 50-facher Vergrößerung erkennbar
1 Schimmelpilzwachstum mit bloßem Auge nicht bzw. schwer, unter der Lupe jedoch deutlich erkennbar
2 Schimmelpilzwachstum mit bloßem Auge erkennbar, bedeckt weniger als 25 % der bewerteten Fläche
3 Schimmelpilzwachstum mit bloßem Auge erkennbar, bedeckt mehr als 25 % der bewerteten Fläche

[3] Bonitierungsschema nach EN ISO 846:
0 kein Wachstum bei mikroskopischer Betrachtung erkennbar
1 kein Wachstum mit bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar
2 Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der bewerteten Fläche bewachsen
3 Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der bewerteten Fläche bewachsen
4 beträchtliches Wachstum, über 50 % der bewerteten Fläche bewachsen
5 starkes Wachstum, ganze bewertete Fläche bewachsen

Auch bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Bonitierungsvorgaben wird deutlich, dass die beiden derzeit eingesetzten Prüfmethoden zu unterschiedlichen Prüfbefunden führen können. Dies betrifft z. B. die verschiedenen Flachsmatten, die Roggenschüttungen W1 und W2 sowie natives Fichtenholz. Hauptursache für diesen Effekt ist, dass bei der DIN IEC 60068-2-10 eine Infektion des Materials mit 8 Prüfpilzen erfolgt, während bei der ÖNORM 6010 keine Pilze aufgeimpft werden. In eigenen Untersuchungen an Holzwerkstoffen (Kruse et al. 2004) war nachgewiesen worden, dass dies zu unterschiedlichen Befunden führt. Weiter wurde festgestellt, dass die Zuordnung des schlechteren Ergebnisses zwischen beiden Prüfvarianten variiert und somit keine favorisiert werden kann.

Aus diesem Grund wurde für die IHD-Prüfmethode festgelegt, dass obligatorisch beide Prüfvarianten (mit und ohne Beimpfung) durchgeführt werden und das jeweils schlechtere Prüfergebnis für die Bewertung der Materialien herangezogen wird.

Im Ergebnis der Prüfserie ohne Beimpfung nach ÖNORM 6010 wurden die auf den verschiedenen Materialien vorrangig ausgekeimten Pilzarten ermittelt (Tabelle 40). Die entsprechenden Befunde wurden bei der Vorauswahl der Prüfpilze berücksichtigt (vgl. Pkt. 2.4.2).

Für die ETA-Zulassung loser Dämmstoffe ist eine Schimmelpilzprüfung nach vorherigem Rütteltest vorgeschrieben. Weiterhin hat die Prüfung des Materials im Einbauzustand (Soll-Dichte) zu erfolgen. Für ausgewählte Dämmstoffschüttungen wurden die Prüfungen nach vorheriger Alterungsbeanspruchung wiederholt. Dazu wurden die Dämmstoffe mit einer Blasmaschine X-Floc Minifant in eine Lochblechkiste (0,1 m³) eingeblasen (Hobelspäne blieben unverdichtet) und anschließend mechanisch beansprucht (Tabelle 41).

Auffällig war dabei lediglich der hohe Streuverlust der unbehandelten Holzspanschüttung A im Vergleich zur Schüttung B mit Soda/Molke. Die Schimmelpilzbeständigkeit der untersuchten Dämmstoffschüttungen veränderte sich durch die mechanische Vorbeanspruchung jedoch nicht.

Tabelle 41: Alterungsbeanspruchung von Dämmstoffschüttungen

Dämmstoff	Materialdichte [kg/m³]		Streuverlust [%]	
	Einbaudichte	Prüfdichte	Blas-maschine[1]	Rütteltest[2]
Cellulose-Einblasdämmstoff M	35-60	45	1,5	0,1
Holzspanschüttung B2	50-90	70	5,1	2,3
Holzspanschüttung B3	50-90	70	1,9	0,4
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	30-60	45	2,4	0,2
Cellulose-Rohmaterial Q	30-60	45	1,0	0,1

[1] bezogen auf Einwaage lufttrocken
[2] bezogen auf eingeblasenes Material

2.4.3.2 Prüfung nach der IHD-Methode VA 20-24/1

Die entwickelte IHD-Prüfmethode VA 20-24/1 ist in Anlage 5 dokumentiert. Die Schimmelpilzbeständigkeit aller im Projekt untersuchten Materialien wurde nach dieser Methode erneut geprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 42 dargestellt.

Tabelle 42: Ergebnisse der Schimmelpilzprüfung nach VA 20-24/1

Dämmstoff	Bonitierung[1] der Prüfvariante		Klassifizierung
	Mit Beimpfung	Ohne Beimpfung	
Schafwollmatte A	0	0	beständig
Flachsmatte G1	2	2	mäßig beständig
Flachsmatte G2	2	2	mäßig beständig
Flachsmatte K	2	1-2	mäßig beständig
Flachsmatte AG	3	3	nicht beständig
Seegrasmatte AG	3	3	nicht beständig
Celluloseplatte M	0	1	beständig
Holzfaserplatte AF1	2-3	3	nicht beständig
Holzfaserplatte AF2	2	3	nicht beständig
Schafwolle-Rohmaterial A	0	0	beständig
Flachs-Rohmaterial K	3	3	nicht beständig
Flachs/Polyester-Rohmaterial G	3	3	nicht beständig
Seegras-Rohmaterial AG	3	3	nicht beständig
Cellulose-Rohmaterial Q	0	0	beständig
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	0	0	beständig
Cellulose-Einblasdämmstoff M	0	0	beständig
Roggenschüttung W1	3	2	nicht beständig
Roggenschüttung W2	3	2	nicht beständig
Holzspanschüttung B1	0	0	beständig
Holzspanschüttung B2	1	1	beständig
Holzspanschüttung B3	1	1	beständig
Lehm-Holzfaserschüttung AE	3	3	nicht beständig
Steinwolle	0	0	beständig
Glaswolle	0	0	beständig
Polystyrol-Hartschaum	0	0	beständig
Steinwolle	0	0	beständig
Kiefernsplintholz	3	3	nicht beständig
Fichte	1	3	nicht beständig

[1] Bewertung gemäß Tabelle 38 und Tabelle 39

Die mineralischen Dämmstoffe sowie unbehandelte Schafwolle (Rohmaterial) erwiesen sich erwartungsgemäß als schimmelpilzresistent. Am Beispiel der Steinwolle wurde jedoch gezeigt, dass bei Zugabe von Nährstoffen, was einer Verschmutzung unter praktischen Bedingungen entsprechen kann, Schimmelwachstum auch auf diesen Materialien möglich ist.

Die meisten Rohstoffe der NAWARO-Dämmstoffe waren stark schimmelpilzanfällig (Flachs, Hanf, Seegras). Hingegen wurde das Cellulose-Rohmaterial Q entgegen früherer Prüferfahrungen mit vergleichbaren Cellulose-Rohstoffen auf Basis von Altpapier nicht von Schimmelpilzen bewachsen. Die Ursachen dafür sind zur Zeit nicht geklärt.

Die sodabehandelten Holzspanschüttungen sowie die boratbehandelten Cellulose-Dämmstoffe erwiesen sich als schimmelpilzbeständig, während borsalzbehandelte Flachs-Dämmstoffe nur eine mäßige Beständigkeit zeigten. Letzteres kann möglicherweise auf die sehr hohe Ausgleichsfeuchte dieser Materialien von mehr als 200 % im Prüfklima zurückzuführen sein.

Überraschend verhielten sich die Roggenschüttungen W1 und W2. Ihre im Lieferzustand sehr hohen pH-Werte von etwa 12 sanken nach ca. 4 Wochen Lagerung im feuchten Prüfklima auf bis zu 8,7 und damit in einen für die Schimmelpilzentwicklung günstigeren Bereich. Infolgedessen wurden diese Produkte von Schimmelpilzen bewachsen, wobei der Bewuchs erst im letzten Viertel des Prüfzeitraums sichtbar wurde.

2.4.3.3 Vergleichsuntersuchungen

Die Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin (BAM), Fachgruppe VI.1, AG Materialbeständigkeit gegenüber Organismen, wurde mit Vergleichsuntersuchungen nach VA 20-24/1 an ausgewählten Dämmstoffvarianten beauftragt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen (Bewertungsschema siehe Tabelle 38 und Tabelle 39) sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen IHD und BAM Berlin

Dämmstoff	**Bewertung des Schimmelpilzwachstums nach Prüfung (mit Beimpfung / ohne Beimpfung)**			
	IHD		**BAM**	
Flachsmatte K	2 / 1-2	mäßig beständig	2 / 2	mäßig beständig
Holzspanschüttung B2	1 / 1	beständig	1 / 0	beständig
Holzfaserplatte AF1	2-3 / 3	unbeständig	1 / 2	mäßig beständig
Celluloseschüttung Q	0 / 0	beständig	0 / 0	beständig
Cellulose-Rohmaterial Q	0 / 0	beständig	0 / 0	beständig
Lehm-Holzfaserschüttung AE	3 / 3	unbeständig	3 / 3	unbeständig

Wesentliche Abweichungen zwischen den beiden Prüfinstitutionen traten nur bei der Holzfaserplatte AF1 auf. Sie sind möglicherweise auf die nach wie vor subjektive und erfahrungsabhängige Bonitierung zurückzuführen. Alle

anderen Prüfbefunde und Produktklassifizierungen stimmten überein. Damit wurde die Anwendbarkeit und Reproduzierbarkeit der Prüfmethode bestätigt.

2.4.4 Wirksamkeit potenzieller fungizider Zusätze

An zwei nicht schimmelpilzbeständigen Materialien, losem Seegras und einer unbehandelten Flachsmatte, wurde die Verbesserung der Schimmelpilzbeständigkeit durch Zugabe verschiedener pilzwidriger Wirkstoffe untersucht (Tabelle 44).

Die Behandlung erfolgte durch Kurztauchen mit anschließender Trocknung bei 40 °C und Konditionierung im Normalklima (20/65) über einen Zeitraum von 4 Wochen.

Die besten Resultate wurden dabei mit dem Produkt Bardac 2270 auf Basis quaternärer Ammoniumverbindungen erzielt. Wirksam war zudem eine Imprägnierung mit Borax-Lösung. Eine geringe Wirkung konnte für Wasserglas und Soda nachgewiesen werden.

Tabelle 44: Verbesserung der Schimmelpilzbeständigkeit durch fungizide Zusätze

Schimmelwidriger Zusatz	Bewertung[1] des Pilzwachstums nach 4 Wochen	
	ohne Beimpfung	mit Beimpfung
Loses Seegras		
Borax (5 % in Wasser)	1	1
Quat (Bardac 2270; 5 % in Wasser)	0	0
Wasserglas (Betol K35T3; 5% Feststoffgehalt)	2	3
Soda (5% in Wasser)	2	2
Kontrolle ohne Additiv	3	3
Flachsmatte		
Borax (5 % in Wasser)	1	2
Quat (Bardac 2270; 5 % in Wasser)	0	0
Wasserglas (Betol K35T3; 5% Feststoffgehalt)	1	0
Soda (5% in Wasser)	0	0
Kontrolle ohne Additiv	3	2

[1] Bewertung gemäß Tabelle 38 und Tabelle 39

2.5 Verwertung der Ergebnisse

Der Kontakt und die Interessenvertretung der Projektpartner zu relevanten Normungsgremien (CEN/TC 88) erfolgten im Rahmen des Projektes im Unterauftrag durch Frau Sabine Groeneveld.

Laut Mandat M 103 müssen die Hersteller von Holz- und Cellulosefaserdämmstoffen die Schimmelpilzresistenz nachweisen. Diese Anforderung an

die Produktbeschreibung kann formal entweder mit einem produktspezifischen Anhang oder mit einer allgemeinen Prüfnorm als Bezugsnorm abgedeckt werden. Dafür sind derzeit 3 Wege denkbar:

A) Einführung über die Zellulose-Produktnorm:

Das ursprüngliche Ziel, die neue IHD-Prüfmethode in der Cellulose-Produktnorm prEN 15101 zu verankern, wurde nicht erreicht, da die Methodenentwicklung sich zeitlich mit der Normbearbeitung auf CEN-Ebene überschnitt und die Methode nicht rechtzeitig vorlag. Die beiden neuen Entwürfe (Teil 1 und Teil 2) der europäischen Cellulose-Dämmstoffnorm vom 17. Mai bis 17. August 2007 lagen dem nationalen Spiegelausschuss im Rahmen einer internen Vorumfrage des CEN/TC 88 zur Beratung vor und wurden im wesentlichen bestätigt. Damit erfolgt in 2008 das Formal-Vote-Verfahren zur endgültigen Verabschiedung der Standards. In dieser Phase ist eine Einbringung der IHD-Prüfmethode zur Bestimmung der Schimmelpilzresistenz nicht mehr sinnvoll. Da jedoch die Normen turnusmäßig alle 5 Jahre überprüft werden, wäre rein formal ein Änderungsantrag nach Inkrafttreten der Norm möglich. Dies ist allerdings eine sehr langfristige Perspektive.

Wenn es gelänge, das IHD-Prüfverfahren auf diesem Weg in die Normung einzuführen, könnte es auch mit geringem Aufwand in die Produktnormen anderer Produktgruppen übernommen werden oder als allgemeine Prüfnorm für die CEN und/oder ISO-Ebene vorgeschlagen werden.

B) Einführung über die Prüfnormengruppe WG 1 in CEN/TC 88:

Es ist geplant, die im Projekt entwickelte angepasste Prüfmethode 2008 beim entsprechenden Normungsgremium einzureichen. Die Vertreter der WG 1 werden diese dahingehend beurteilen, ob sie in die Liste für Bezugsnormen bei CEN/TC 88 aufgenommen werden soll.

C) Einführung über ISO:

Hierzu müsste ein Land (z. B. Deutschland) einen Antrag bei der ISO-Behörde in Genf stellen, und mindestens drei andere Länder müssten dieses Normungs-Vorhaben unterstützen. Weitere Voraussetzung ist die Gewährleistung der Finanzierung. Das Sekretariat könnte vom DIN übernommen werden, wobei die dem DIN hierdurch entstehenden Kosten von interessierten Unternehmen übernommen werden müssten, zusätzlich zu deren eigenem zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand. Sollte die Prüfnorm auf ISO-Ebene etabliert werden, ist eine Übernahme als CEN-Norm möglich (Wiener Vereinbarung). Der Weg über eine ISO-Normeinführung wird nach derzeitigen Erfahrungen aus Kostengründen nicht für durchführbar gehalten. Das weitere Vorgehen bedarf einer Diskussion mit betroffenen Herstellern, da eine Normetablierung nur mit Unterstützung interessierter Unternehmen realisiert werden kann.

2.6 Zusammenfassung und Diskussion

Projektziel war die Erarbeitung einer Labormethode zur Prüfung der Resistenz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen gegenüber Schimmelpilzen. Diese wurde zunächst als IHD-Verfahrensanweisung VA 20-24/1 (Anlage 5) etabliert und soll mittelfristig als verbindliche Prüfnorm in die europäische Normung (u.a. für lose Dämmstoffe) einfließen. Daneben sollten derzeit marktübliche Dämmstoffe nach aktuell vorgeschriebenen Prüfmethoden DIN EN 60068-2-10 sowie ÖNORM 6010/EN ISO 846 sowie vergleichend nach der modifizierten IHD-Prüfmethode untersucht und hinsichtlich ihrer Schimmelpilzresistenz bewertet werden.

Zunächst wurden ausgewählte geformte und lose Dämmstoffprodukte hinsichtlich wesentlicher, die Schimmelpilzbeständigkeit beeinflussender Eigenschaften umfassend charakterisiert. Dazu wurde der pH-Wert und das Feuchteverhalten ermittelt. An ausgewählten Dämmstoffen wurden zudem die fungiziden Additive chemisch analysiert.

Für Schüttdämmstoffe aus Roggengranulat sowie eine Produktvariante der mit Soda behandelten Hobelspäne wurde eine hohe Alkalität (pH ≥ 10) ermittelt, woraus zunächst abgeleitet wurde, dass diese Materialien schimmelpilzbeständig sind. Dies konnte für die Hobelspäne durch die späteren Schimmelpilzprüfungen auch bestätigt werden. Die Roggenschüttungen erwiesen sich hingegen als nicht schimmelpilzbeständig. Weitere Untersuchungen zur Aufklärung dieses Effektes führten zu der überraschenden Erkenntnis, dass der pH-Wert dieser Materialien nach 4-wöchiger Lagerung unter den Bedingungen des Prüfklimas durch nicht weiter untersuchte hydrolytische Prozesse von etwa 12 auf unter 9 sank, wodurch Schimmelpilzbefall möglich war. Eine Reihe von Dämmstoffen und Rohmaterialien sowie die Vollhölzer wiesen neutrale bis leicht saure pH-Werte auf. Hier musste unter bestimmten Bedingungen (z. B. kein Zusatz fungizider Additive) von einer erhöhten Schimmelpilzanfälligkeit ausgegangen werden. Da viele weitere Faktoren die Schimmelpilzbeständigkeit beeinflussen, insbesondere die von Pilzen verwertbaren Inhaltsstoffe, das Feuchteverhalten oder fungitoxische Inhaltsstoffe, war ein eindeutiger Zusammenhang zwischen pH-Wert und Schimmelpilzbeständigkeit bei diesen Materialien nicht herzustellen.

Die Ausgleichsfeuchte wies, insbesondere bei dem bisher üblichen Klima für Schimmelpilzprüfungen, große Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien auf. Besonders gravierend war die Ausgleichsfeuchte bei den Produkten aus Seegras (aufgrund des Salzgehaltes) und Flachs mit zum Teil über 200 %. Bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der Auffeuchtung wurde zudem eine sprunghafte Erhöhung der Feuchteaufnahme bei > 95 % deutlich. Dies stellt eine praxisuntypische Belastung dar, der die Dämmstoffe bei der Prüfung ausgesetzt sind. Es wurde erwartet, dass Dämmstoffe mit einer hohen Ausgleichsfeuchte, wie die Flachs- und Seegrasprodukte sowie die Celluloseplatte M, eine geringere Schimmelpilzbeständigkeit aufweisen als vergleichbare Materialien mit niedrigeren Ausgleichsfeuchten. Im Ergebnis der Schimmelpilzprüfungen war die Celluloseplatte M aufgrund ihrer Behandlung mit Borverbindungen trotz der hohen Ausgleichsfeuchte von 134 % schimmelpilzbeständig. Flachs- und Seegrasprodukte waren nicht schimmelpilzbeständig (unbehandelte Produkte) oder mäßig beständig (mit Boraten behandelte Flachsprodukte). Ein eindeutiger Zusammenhang

zwischen Ausgleichsfeuchte und Schimmelpilzbeständigkeit konnte jedoch nicht abgeleitet werden, da weitere Einflussfaktoren in Betracht zu ziehen waren.

Mittels eines qualitativen Farbtests konnte die Behandlung von Flachsdämmstoffen und Vollholz mit Borverbindungen eindeutig nachgewiesen werden. Bei Cellulose-Dämmstoffen auf Basis von Altpapier waren hingegen keine eindeutigen Nachweise von Borverbindungen möglich. In ausgewählten Materialien wurde die Verteilung der Borverbindungen qualitativ und quantitativ untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Additive gleichmäßig in den Dämmstoffen verteilt vorlagen. Einblasdämmstoffe aus Cellulose wiesen auch nach mechanischer Belastung im Rütteltest keine Veränderung des Gehaltes und der Verteilung von Borverbindungen auf.

Im Rahmen der Prüfmethodenentwicklung wurden experimentelle Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Prüfpilze, zur Bestimmung der Beimpfungskonzentration, zur Variation des Prüfklimas und zur Untersuchung des Einflusses von Nährstoffzusätzen durchgeführt. Obligatorische Prüfbedingungen bzw. Arbeitsschritte bezüglich der Prüfvarianten, der Herstellung der Sporensuspension, der Prüfkörpervorbereitung und Prüfanordnung sowie der Kontrolle des Prüfablaufs wurden festgelegt. Weiterhin wurde ein für Dämmstoffe geeignetes Bonitierungssystem etabliert und eine praxisbezogene Interpretation der Prüfbefunde in Form eines Klassifizierungssystems vorgeschlagen.

Die entwickelte Prüfmethode wurde in Form einer IHD-Verfahrensanweisung dokumentiert (Anlage 5, IHD VA 20-24/1). Sie zeichnet sich durch folgende wesentliche Besonderheiten aus:

- Es werden zwei obligatorische Prüfvarianten – mit und ohne Beimpfung – vorgeschrieben. Ausschlaggebend für die Klassifizierung der Dämmstoffe ist jeweils die schlechteste Bewertung.
- Optional ist eine verschärfte Prüfvariante mit Nährstoffzugabe, z. B. zur Prüfung der Wirksamkeit fungizider Zusätze.
- Die Anzahl der Prüfpilze wird gegenüber DIN-EN-60068-2-10 reduziert. Für alle Prüfpilze wurde ein gutes bis sehr gutes Wachstum sowie eine gute visuelle Erkennbarkeit auf verschiedenen Dämmstoffen nachgewiesen.
- Die Vorbereitung der Prüfansätze für geformte und lose Dämmstoffprodukte wird festgelegt.
- Konkrete Vorgaben zur Beimpfung werden festgelegt (Herstellung Sporensuspension, Beimpfungskonzentration), wobei die Art des eingesetzten Beimpfungsgerätes variabel ist.
- Es wird eine neues Bonitierungssystem vorgeschlagen, das auf dem Einsatz definierter Vergleichsmaterialien und einer relativen Bewertung des Pilzwachstums beruht.
- Es wird ein Klassifizierungssystem für Dämmstoffe vorgeschlagen, das eine Aussage zur Verwendbarkeit ermöglicht.

Mit den beiden bisher im Rahmen der amtlichen Registrierung und Zulassung eingesetzten Prüfvorschriften wurden zum Teil widersprüchliche Prüfbefunde für die Dämmstoffe ermittelt.

Es zeigte sich, dass praxisrelevantere Prüfbedingungen mit geringerer Feuchtebelastung der Dämmstoffe aufgrund prüftechnischer Anforderungen (differenzierte Ergebnisse für verschiedene Materialien in vertretbarem Prüfzeitraum von 4 Wochen) nicht realisierbar waren. Deshalb wurde eine Prüfung unter Worst-case-Bedingungen zunächst beibehalten. Eine Entscheidung, ob dem prüftechnisch zu bevorzugenden scharfen Klima 28/>95 oder beispielsweise dem praxisnäheren und für die Wärmeleitfähigkeitsmessung eingeführten Klima 23/80 der Vorzug zu geben ist, muss in den entsprechenden Normungsausschüssen (CEN/TC 88) bzw. in den Gremien des DIBt gemeinsam mit den Dämmstoffherstellern getroffen werden. Die Diskussion hierzu sollte bereits im Rahmen der Auswertung des FNR-Verbundvorhabens geführt werden.

Im Ergebnis der Schimmelpilzprüfungen wurde nachgewiesen, dass alle NAWARO ohne fungizide Zusätze mehr oder weniger unbeständig gegen Schimmelpilzbefall sind. Allerdings sind fungizide Additive von Seiten der Verbraucher nicht erwünscht. Aus diesem Grund sind als Flammschutzmittel eingesetzte Borverbindungen von Vorteil, da sie zusätzlich schimmelpilzwidrig sind. Im Gegensatz dazu wirken Ammoniumsulfat und Ammoniumphosphat, die häufigsten Ersatzverbindungen für Borate in Baustoffen, nicht gegen Schimmelpilze, sondern können deren Wachstum durch Freisetzung von Ammoniak unter bestimmten pH- und Temperaturbedingungen sogar fördern (Fogel 2002).

2.7 Literatur

ASTM C 1338 (2000): Standard Test Method for Determining Fungi Resistance of Insulation Materials and Facings

ASTM C 739 (2003): Standard Specification for Cellulosic Fiber Loose-Fill Thermal Insulation

ASTM D 2020 (1992): Prüfverfahren für die Schimmel-(Pilz-) Festigkeit von Papier und Pappe (Revision 1999), Test Method for Mildew (Fungus) Resistance of Paper and Paperboard

ASTM D 3273 (1994): Bestimmung der Beständigkeit von Innenbeschichtungen gegen Schimmelbildung, Verfahren in der Klimakammer; Test Method for Resistance to Growth of Mould on the Surface of Inetrior Coatings in an Environmental Chamber

ASTM D 4445 (1996): Standard Test Method for Fungicides for Controlling Sapstain and Mold on Unseasoned Lumber (Laboratory Method); Fungizidprüfung zur Kontrolle von Splintverfärbung und Schimmelansatz an ungelagertem Schnittholz (Laborverfahren)

ASTM D 4576 (1986): Prüfung des Widerstandes von Leder gegen Schimmelpilzbildung (Revision 1996); Test Method for Mold Growth Resistance of Blue Stock (Leather)

ASTM D 4783 (1998): Bestimmung des Widerstandes von Klebstoffen gegenüber Bakterien, Hefen und Pilzen (2. Revision 1998); Test Methods for Resistance of Adhesive Preparations in Container to Attack by Bacteria, Yeast and Fungi

ASTM D 5590 (2000): Standard Test Method for Determining the Resistance of Paint Films and Related Coatings to Fungal Defacement by Accelerated Four-Week Agar Plate Assay

ASTM D 6329 (1998): Standard Guide for Developing Methodology for Evaluating the Ability of Indoor Materials to Support Microbial Growthy Using Static Environmental Chambers

ASTM E 875 (1994): Bestimmung der Wirksamkeit von Fungiziden in wässrigen Substanzen der Papierindustrie; Test Method for Efficacy of Fungal Control Agents as Preservatives for Aqueous-Based Products Used in the Paper Industry

ASTM G 21 (1996): Prüfung der Schimmelfestigkeit von synthetischen Polymerwerkstoffen; Determing Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi

DIN 58 390 Teil 11 (1985): Umweltprüfung von optischen Geräten – Schimmelwachstum, zurückgezogen und ersetzt durch DIN ISO 9022-11: 2000-09

DIN IEC 60 068 Teil 2-10 (1991): Elektrotechnik - Grundlegende Umweltprüfverfahren - Prüfung J und Leitfaden: Schimmelpilzwachstum (IEC 68 Teil 2-10:1988)

DIN IEC 60 068 Teil 2-10 (2003): Umweltprüfungen – Teil 2-10: Prüfungen – Prüfung J und Leitfaden: Schimmelwachstum, Ersatz für DIN IEC 60 068 Teil 2-10, 1991-04

DIN V ENV 53 931 (1993): Prüfung von Textilien – Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Textilien gegen Schimmelpilze - Bewuchsversuch

E DIN 4108 (1999): Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil x: Vermeidung von Schimmelpilzen. Beuth-Verlag 1999-05 Deutsches Institut für Normung:

EN ISO 846 (1997): Kunststoffe – Bestimmung der Einwirkung von Mikroorganismen auf Kunststoffe

Fogel J und Lloyd JD (2002): Mold perrformance of some construction products with and without borates. For. Prod. J. Madison 52 (2002) 2, S. 38-43

Grinda, M., Kerner-Gang, W.(1982): Prüfung der Widerstandsfähigkeit von Dämmstoffen gegenüber Schimmelpilzen und holzzerstörenden Basidiomyceten. In Material und Organismen, 17 S. 135 – 156

Hawksworth DL (2001): The magnitude of fungal diversity: the 1.5million species estimate revisited. Mycological research 105: 1422-1432

IHD (2003a): Untersuchungen zum Verhalten ausgewählter Bau- und Holzwerkstoffe gegenüber Schimmelpilzen. Abschlussbericht zum BMWi-Projekt Reg.-Nr. 39/01. Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH. Eigenverlag

IHD (2003b): Merkblatt "Schimmelpilzbefall an Holz und Holzwerkstoffen" Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH. Eigenverlag

IHD (2005): Entwicklung verbesserter Restaurierungsprodukte und -maßnahmen zur Sanierung und Vorbeugung von Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut. Abschlussbericht zum BMWi-Projekt Reg.-Nr. 122740 vom 10.01. 2005. Eigenverlag Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH

IHD (2006): Merkblatt "Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut aus Holz". Institut für Holztechnologie gGmbH. Eigenverlag

ISO/CD 12574-3 (2001): Thermal insulation – Loose-fill for horizontal applications in ventilated roof spaces – Part 3: Test Method

Jacobs K (2007): Schimmelpilzprüfung von Dämmstoffen. Vortrag beim Statusseminar Dämmstoffe am 29./30. November 2007 im Handwerksbildungszentrum Münster

Jasch E und Springborn M (2006): Bauaufsichtliches Anwendungskonzept zu den europäischen technischen Spezifikationen in Deutschland. DIBt-Mitteilungen 1/2006

Keller R, Senkpiel K, Seidl HP (2007): Einfluss von Klimafaktoren auf Mikroorganismen und Baumaterialien. Tagungsband zur XI. Fachtagung für Umwelthygiene an der Universität Lübeck.

Kruse K, Langensiepen P, Plaschkies K, Scheiding W, Weiß B (2004).: Schimmelbeständigkeit von Bau- und Holzwerkstoffen. Holz-Zentralblatt 14, S.186

Mücke W, Lemmen C (1999): Schimmelpilze; Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen. ecomed Verlagsgesellschaft

NWPC Standard (1979): Mycological testing of anti-stain preservatives for freshly sawn timber – The mini-board method

ÖNORM B 6010 (1999): Dämmstoffe für den Wärme- und /oder Schallschutz im Hochbau - Prüfmethoden

Peylo A (1993): Borbestimmung im Holz durch Extraktion mit Mannitol. Holz als Roh- und Werkstoff 51 (1993) 335-8

Plaschkies K, Weiß B, Scheiding W, Jacobs K (2006): Schimmelpilzbefall an Holz und Holzwerkstoffen- Ergebnisse aus der Forschung. 10. Pilztagung des VDB, Dessau

Reiss J (1997): Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. Springer-Verlag

Samson RA, Hoekstra ES, Frisvad JC, Filtenborg O (1996): Introduction to food-borne fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures

Scheiding W (1998): Entwicklung, Herstellung und Untersuchung wesentlicher Eigenschaften wasserglasgebundener Holzfaserdämmplatten aus Fichtenholz. Dissertation TU Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften 1998

Scheiding W (2007): Schimmelpilzbefall an Holz und Holzwerkstoffen. Bedeutung und Maßnahmen. 25. Holzschutztagung der DGfH 20./21.09.2007 in Biberach/Riß.

Scheiding W; Jacobs K (2007): Schimmelpilzprüfung von Dämmstoffen. 2. Mykologisches Kolloquium IHD Dresden 15./16.11.2007

Scheiding W (2007): Schimmelpilzbefall - Bewertung und Maßnahmen. Vortrag beim Statusseminar Dämmstoffe am 29./30. November 2007 im Handwerksbildungszentrum Münster

Scheiding W, Jacobs K (2007): Schimmelpilzprüfung von Dämmstoffen. Vortrag beim 2. Mykologischen Kolloquium: Pilze auf Werkstoffen - Erkennen, Bewerten, Vermeiden am 15.16. November 2007 im IHD

Scheiding W, Plaschkies K, Weiß B (2006): Mykologische, holzschutztechnische und bauklimatische Untersuchungen an schimmelpilzbefallenen Einrichtungs- und Kunstgegenständen aus Holz in Kirchen. Holztechnologie 47- 4: 45-50

Umweltbundesamt (2002): Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen ("Schimmelpilz-Leitfaden"). Umweltbundesamt Berlin, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (Bearbeiter Moriske, H.-J.; Szewuzyk, R.)

VDB (2007) [ed.]: Nachweis, Bewertung, Sanierung und Qualitätssicherung von Schimmelpilzen in Innenräumen. Tagungsband zur 11. Pilztagung des VDB (Berufsverband Deutscher Baubiologen – VDB e.V.) am 11./12.06.2007 in Dresden

VdL-RL06 (1998): Richtlinie zur Bestimmung der Beständigkeit von Beschichtungsstoffen gegen Pilzbefall. Ausgabe November 1998. Verband der Lackindustrie e.V.

Weiß B, Plaschkies K, Scheiding W (2004): Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralen Kunstwerken. Restauro 2: 135-140

Weiß B, Plaschkies K, Scheiding W (2005): Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut. Ein Projekt zur Untersuchung der Ursachen. Restauro 11: 135-140

Weiß B, Wagenführ A, Kruse K (2000): Bestimmung und Beschreibung von Bauholzpilzen. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag

Winter S, Schmidt D, Schopbach H (2003): Schimmelpilzbildung bei Dachüberständen und an Holzkonstruktionen. F 2423 Fraunhofer IRB Verlag

2.8 Anlagen

Anlage 1 zum IHD-Abschlussbericht 122710

Vergleich von ausgewählten Methoden zur Schimmelpilzprüfung von Materialien (unter Berücksichtigung der Eignung für Dämmstoffe)

Prüfmethode	DIN IEC 60068-2-10: 2006	DIN EN ISO 846: 1997	ÖNORM B 6010:1999	ASTM C 1338:2000	ASTM C 739:2003	Grinda/ Kerner-Gang 1982
Prüfmaterial	Elektrotechnische Erzeugnisse (i.d. R. Kunststoffe)	Kunststoffe; nicht für poröse Materialien, wie z. B. Schaumstoffe	Dämmstoffe für den Wärme-/Schallschutz	Dämmstoffe und Beschichtungen	Lose Cellulosedämmstoffe	Dämmstoffe
Ziel	Beständigkeit von elektrotechnischen Erzeugnissen gegen Schimmelpilze (Oberflächenbewuchs und Funktionsfähigkeit)	Beständigkeit von Kunststoffen gegen Schimmelpilze, Bakterien und Erdorganismen	u.a. Schimmelpilzbeständigkeit von geformten (werkmäßig endgefertigten) Dämmstoffen, wie Filze, Matten, Bahnen und Platten	Prüfung der Fähigkeit von Dämm-Materialien und deren Beschichtungen, Schimmelpilzwachstum zu unterstützen	Resistenz gegen Schimmelpilze, die in losen Zellulosedämmstoffen auftreten; Resistenz des Dämmstoffes im Vergleich zum Konstruktionsmaterial (i. d. R. Vollholz)	Beständigkeit von Dämmstoffen gegen Schimmelpilze
Verfahren	Mit Beimpfung, mit und ohne Nährstoffzugabe	Mit Beimpfung, mit und ohne Nährstoffzugabe	Ohne Beimpfung, ohne Nährstoffzugabe	Mit Beimpfung, ohne Nährstoffzugabe	Mit Beimpfung, ohne Nährstoffzugabe	Mit und ohne Beimpfung
Prüforganismen	*Aspergillus niger, Aspergillus terreus, Chaetomium globosum, Hormoconis resinae, Paecilomyces variotii, Penicillium funiculosum, Scopulariopsis brevicaulis, Trichoderma viride* (Syn.: *Gliocladium virens, Trichoderma virens*)	*Aspergillus niger, Chaetomium globosum, Penicillium funiculosum, Paecilomyces variotii, Trichoderma viride* (Syn.: *Gliocladium virens, Trichoderma virens*)	keine	*Aspergillus niger, Aspergillus versicolor, Aspergillus flavus, Chaetomium globosum, Penicillium funiculosum*	*Aspergillus niger, Aspergillus versicolor, Aspergillus flavus, Chaetomium globosum, Penicillium funiculosum*	*Aspergillus niger, Aspergillus terreus, Aspergillus versicolor, Penicillium funiculosum, Penicillium ochrochloron, Paecilomyces variotii, Trichoderma virens, Aureobasidium pullulans, Chaetomium globosum, Glenospora praphii, Humicola grisea, Petriella setifera, Trichurus spiralis*
Vergleichsmaterial	-	-	-	Birkenholz-Zungenspatel oder	Vollholz, wie üblicherweise für Rahmenkonstruktion verwen-	-

				Southern yellow pine (Material der Rahmenkonstruktion)	det, Southern pine	
Vorkultivierung und Herstellung Sporensuspension						
Nährmedium	Malzextraktagar	Hafermehl (2%)-Malzextrakt (1%)-Agar (2%)	-	-	-	-
Inkubations-zeit	7 bis 14 Tage	max. 28 Tage	-	5 Tage oder länger	9 Tage oder länger	7 bis 14 Tage
Temperatur	(29 ± 1) °C	(24 ± 1) bzw. (29 ± 1) °C	-	(30 ± 2) °C	30 °C	22 bis 24 °C
Lagerung	max. 6 Wochen im Kühl-schrank	-	-	-		-
Herstellung der Sporen-suspension	Sporen mit dest. Wasser und Netzmittel abspülen; Einzel-suspensionen filtrieren; zentrifugieren; waschen; Auf-nahme in Mineralsalzlösung mit oder ohne C-Quelle; Spo-renkonzentration durch Ver-dünnung einstellen; gleiche Volumenteile aller Einzelsus-pensionen vereinigen	Sporen mit Mineralsalzlösung und Netzmittel abspülen; Ein-zelsuspensionen filtrieren; zentrifugieren und waschen; Aufnahme in Mineralsalzlö-sung mit oder ohne C-Quelle; Sporenkonzentration bestim-men; gleiche Volumenteile aller Einzelsuspensionen vereinigen	-	Sporen mit dest. Wasser unter Zugabe von max. 0,1 g/l Netzmittel abspülen; Einzel-suspensionen mit Glasperlen vortexen, filtrieren; zentrifugie-ren; 3 x waschen sterilem Wasser (ggf. mit Detergenz), Aufnahme in sterilem Wasser, Sporenkonzentration durch Verdünnung einstellen; glei-che Volumenteile aller Einzel-suspensionen vereinigen	Sporen mit dest. Wasser unter Zugabe von max. 0,1 g/l Netzmittel abspülen; Einzel-suspensionen mit Glasperlen vortexen, filtrieren; zentrifugie-ren; 3 x waschen sterilem Wasser (ggf. mit Detergenz), Aufnahme in sterilem Wasser, Sporenkonzentration durch Verdünnung einstellen; glei-che Volumenteile aller Einzel-suspensionen vereinigen	Sporen mit dest. Wasser und Netzmittel abspülen; Einzel-suspensionen filtrieren; zentrifugieren; waschen; Auf-nahme in Mineralsalzlösung mit oder ohne C-Quelle; Spo-renkonzentration durch Ver-dünnung einstellen; gleiche Volumenteile aller Einzelsus-pensionen vereinigen
Sporenzahl	10^6 bis 2*10^6 Sporen/ml	10^6 Sporen/ml	-	10^6 bis 2*10^6 Sporen/ml	10^6 bis 2*10^6 Sporen/ml	10^6 Sporen/ml
Lagerung Sporensus-pension	Anwendung innerhalb 6 h nach Herstellung	Anwendung innerhalb 6 h nach Herstellung	-	Bis 28 Tage bei (6 ± 4) °C oder bis Wachstum im ver-schlossenen Lagergefäß auf-tritt, oder bis der Vitalitätstest versagt	Bis 7 Tage bei (6 ± 4) °C	keine Angabe
Prüfansatz						

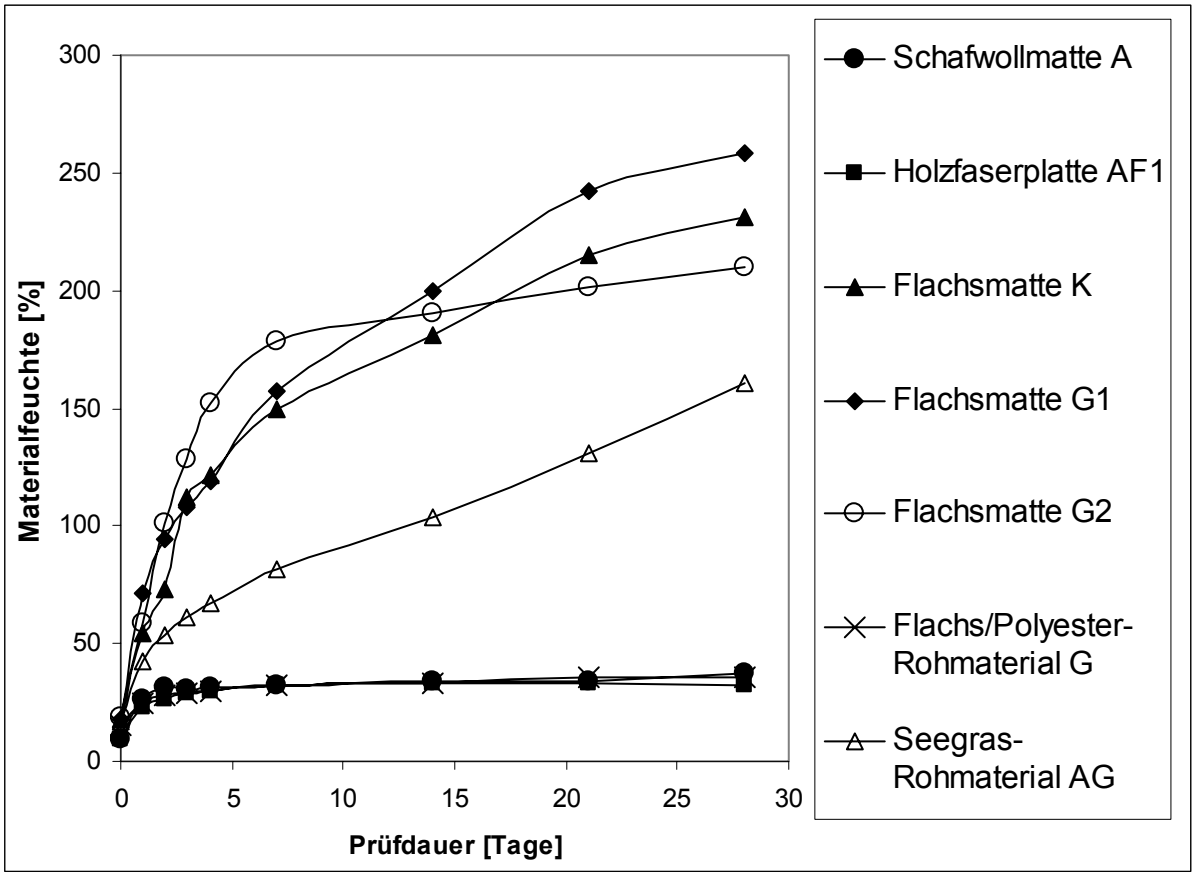
Vorbehandlung der Prüfkörper	Prüfkörper im Anlieferungszustand unsteril eingesetzt; mindestens 4-stündige Lagerung unter Bebrütungsbedingungen (29 ± 1) °C und >90% rel. LF unmittelbar vor Einbau	unsteril	unsteril	unsteril	Unsteril, definierte Anfeuchtung der Prüfkörper mit sterilem destilliertem Wasser	steril
Behälter	Glas- oder Kunststoffbehälter mit Deckel	Petrischalen, Prüfbehälter (z. B. 1-Liter-Gläser mit Deckel)	Gut schließende Glasschale	Petrischale ohne Medium und Deckel im klimatisierten Container	Keine Angabe	1-Liter-Gläser mit Deckel
Prüfanordnung	Prüfkörper über freier Wasserphase ohne direkten Kontakt	Proben einzeln, so flach wie möglich auf Nährboden gelegt, kein Kontakt untereinander bzw. zur Wand der Prüfgefäße, ggf. Beschweren der Proben	Boden des Versuchsgefäßes mit Wasser bedeckt, Probe des Materials ohne direkten Wasserkontakt in dem Gefäß exponieren	Prüfkörper in offener Petrischale	Keine Angabe	An Perlonfäden über Wasser aufgehängt
Nährstoffzusatz	Nährlösung (Mineralsalzlösung mit 3% Sachcharose)	Mineralsalzagar mit 3 % Glucose, pH-Wert 6 bis 6,5	-	-	-	-
Beimpfung	Aufsprühen, Bestreichen oder Tauchen; Vorzugsweise Ultraschall-Aerosol-Gerät	Aufsprühen oder Pipettieren	-	Aufsprühen mit Vernebelungsgerät (Atomizer: 15000 ± 3000 Sporen je cm²)	Besprühen mit Sporensuspension (Atomizer: 15000 ± 3000 Sporen je cm²)	Aufsprühen oder Pipettieren
Beimpfungskonzentration	Keine Angaben	0,1 mL je Prüfkörper	-	0,5 mL je Prüfkörper	0,5 mL je Prüfkörper	Aufsprühen oder Pipettieren
Beanspruchungsdauer	28 Tage, ggf. 56 Tage	Mindestens 4 Wochen, ggf. Verlängerung um jeweils 4 Wochen bis Pilzwachstum auf Proben mit bloßem Auge sichtbar	4 Wochen	Mindestens 28 Tage, ggf. Verlängerung bei bestimmten Materialien erforderlich	28 Tage	28 Tage
relative Luftfeuchte [%]	> 90	im Brutschrank: 90% oder höher	-	(95 ± 4)	≥ 95	≥ 95
Temperatur des Prüfraumes [°C]	28 ... 30	(24 ± 1) oder (29 ± 1)	Raumtemperatur	(30 ± 2)	30	28 °C
Kontrolle Virulenz	Kontrollstreifen aus Filterpapier oder unbehandeltes Baumwollgewebe, getränkt mit Saccharose-Nährlösung	Auskeimen der aufgetropften Sporen-Einzelsuspensionen in separaten Petris mit C-Quelle	-	Beimpfen von sterilisiertem Filterpapier auf Petrischale	Beimpfen von sterilisiertem Filterpapier auf Petrischale (3 Parallelproben)	Kontrollstreifen aus Filterpapier

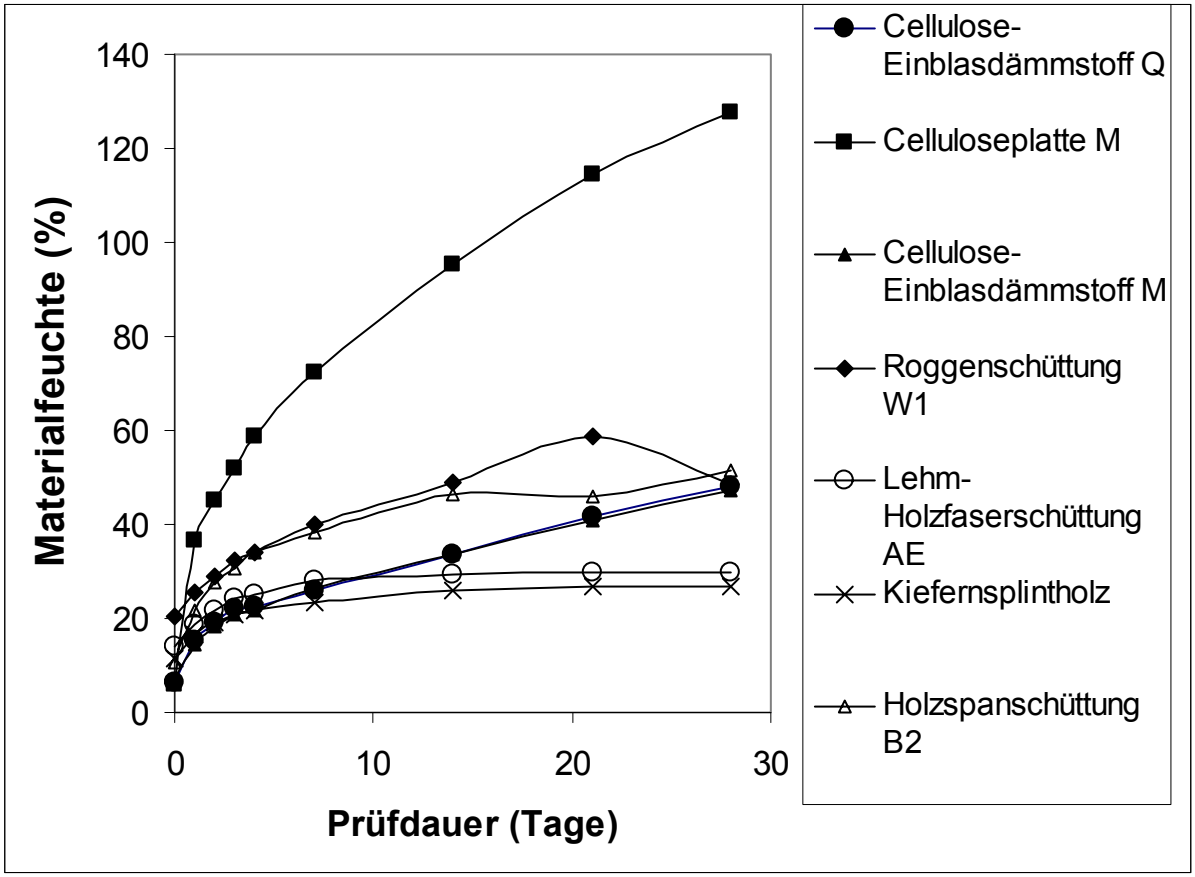
Gültigkeit der Prüfung	Schimmelpilzwachstum von mehr als einer Art auf Kontrollstreifen nach 7 Tagen mit bloßem Auge erkennbar	Starkes Wachstum aller Einzelsuspensionen des Vitalitäts-Kontrollansatzes	-	Wachstum auf den Vitalitäts-Kontrollansätzen nach 3 bis 7 Tagen	Wachstum auf allen Vitalitäts-Kontrollansätzen nach 7 Tagen	Kontrollstreifen aus Filterpapier bewachsen
Auswertung						
Beurteilung; Flächenbewuchs	0 kein Wachstum bei 50facher Vergrößerung 1 mikroskopisch Spuren von Wachstum 2a spärliches Wachstum mit oder ohne Mikroskop, verstreut oder auf wenige Stellen beschränkt, weniger 5% 2b eindeutig mit bloßem Auge sichtbar, < 25% 3 >25 %	0 = kein Wachstum mikroskopisch 1 = im Mikroskop. sichtbar 2 = 25% bewachsen 3 = 50% bewachsen 4 = über 50 % bew. 5 =gesamte Oberfläche stark bewachsen	Ausreichende Schimmelpilzresistenz, wenn Aussehen der Probe nach 4 Wochen unverändert, Bewertung des Schimmelpilzbefalls nach EN ISO 846	-	Bewuchs weniger, gleich oder stärker als auf Vergleichsmaterial	-
Vergrößerung bei Bewertung	0: 50fach (Stereomikroskop) 1: 50fach 2a: 50fach und mit bloßem Auge 2b und 3: mit bloßem Auge	mit bloßem Auge, Stereomikroskop (50fach)	-	40-fach	40-fach	-

Interpretation/Anforderung	„0“ bei Prüfung mit Nährstoffzusatz nur bei Nachweis fungistatischer Wirksamkeit	Ohne Nährstoffzusatz:: 0...inert; 1...Material enthält Nährstoffe oder ist leicht verschmutzt; 2-5...Material nicht resistent Mit Nährstoffzusatz': 0...starke fungistatische Wirkung; 1...keine vollständige fungistatische Wirkung; 2 bis 5: abnehmende bis keine fungistatische Wirkung	Schimmelpilzbeständig, wenn nach 4 Wochen unverändertes Aussehen des Materials Ansonsten gilt Anforderung nach EN ISO 846	Auswertung auf Basis von Vergleichsmaterial: Durchgefallen: Wachstum stärker als auf Vergleichsproben; Bestanden: Wachstum schwächer als auf den Vergleichsproben Auswertung auf Basis von Wachstum ja/nein Durchgefallen, wenn Wachstum erkennbar	-	Abgestufte Bonitierung von 0 (kein Pilzbefall bis 5 (sehr starker Befall)

Anlage 2 zum IHD-Abschlussbericht 122710

Auffeuchtung ausgewählter Dämmstoffe im Prüfklima [28/>95%]




Materialfeuchte (%)
140
120
100
80
60
40
20
0
0
10
20
30
Prüfdauer (Tage)
Cellulose-Einblasdämmstoff Q
Celluloseplatte M
Cellulose-Einblasdämmstoff M
Roggenschüttung W1
Lehm-Holzfaserschüttung AE
Kiefernsplintholz
Holzspanschüttung B2

Anlage 3 zum IHD-Abschlussbericht 122710

Übersicht über die Vorauswahl der Prüfpilze

Prüfpilz	Auswahlkriterien / Ansprüche
Aspergillus niger van Tieghem; z. B. Stamm DSM 1957	einer der weltweit häufigsten Pilzarten (Samson et al. 1996), verbreiteter Lebensmittelverderber und Materialzerstörer, häufiger Prüfpilz in Normverfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien, T_{opt}: 35-37°C, T_{min}: 6-8°C T_{max}: 45-47°C, toleriert stark saure und alkalische Umgebung (pH-Bereich: 1,5-9,8), starkes Wachstum
Chaetomium globosum Kunze: Fries; z. B. Stamm BAM-ATCC 6205	häufiges Auftreten in Innenräumen (Samson et al. 1996), befällt u.a. cellulosehaltige Materialien (Kruse et al. 2004), Moderfäuleerreger an Holz (Weiß et al. 2000), häufiger Prüfpilz in Normverfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien, Indikator für hohe Feuchte, T_{opt}: 18-24°C, pH_{opt}: 7,3
Cladosporium cladosporioides (Fres.) de Fries ; z. B. Stamm IHD-3.RV	weltweit und häufig in Innenräumen auftretend (Samson et al. 1996), u.a. auffällig an Baustoffen (E-DIN 4108)
Cladosporium herbarum (Pers.) Link; z. B. Stamm DSM 63 422	weit verbreitet, u.a. auffällig an Bau- und Holzwerkstoffen (Kruse et al. 2004, Weiß et al. 2004/2005)
Eurotium herbariorum Link; z. B. Stamm IHD-6.RV	gewöhnlich in Innenräumen auftretend, u.a. auffällig an Holz und Holzwerkstoffen (Kruse et al. 2004, Scheiding et al. 2006), xerophil, intensive Gelbfärbung der Cleistothezien
Eurotium rubrum (König, Spiekermann & Bremer), z. B. Stamm DSM 62631	gewöhnlich in Innenräumen auftretend, xerophil, intensiv gefärbtes orange-rotes Myzel (Weiß et al. 2000)
Penicillium funiculosum Thom; z. B. Stamm DSM 1944	häufiger Prüfpilz in Normverfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien, gelegentlich in Innenräumen auftretend (Samson et al. 1996)
Penicillium chrysogenum Thom; z. B. Stamm DSM 4164	häufig in Innenräumen auftretend (Samson et al. 1996), u.a. auffällig an Baustoffen (E DIN 4108)
Penicillium expansum, z. B. Stamm IHD-4.RV	häufig in Innenräumen auftretend (Samson et al. 1996), u.a. auffällig an Holz- und Holzwerkstoffen (Weiß et al. 2004/2005), verbreiteter Obstfäule-Erreger, typischer aromatisch-fruchtiger „Apfel-Geruch"
Paecilomyces variotii Bainier; z. B. Stamm DSM 1961	häufiger Prüfpilz in Normverfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien
Trichoderma viride (Syn.: *Gliocladium virens, T. virens*) (Miller et al.) von Arx ; z. B. Stamm DSM 1963	einer der weltweit verbreitetsten Pilzarten (Samson et al. 1996), häufiger Prüfpilz in Normverfahren zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Materialien, u.a. auffällig an Holz und Holzwerkstoffen (Kruse et al. 2004, Weiß et al. 2004/2005), Tapete und Papier
Trichothecium roseum (Pers.) Link; z. B. Stamm IHD-6.RV	weltweit verbreitet (Samson et al. 1996), u.a. auffällig an Holz und Holzwerkstoffen, intensiv gefärbtes orange-rotes, kräftiges Myzel, schnellwüchsig

Anlage 4 zum IHD-Abschlussbericht 22 00 83 02

Vergleichende Bewertung der Pilze hinsichtlich visueller Erkennbarkeit und Herstellung der Sporensuspension

Pilzart	Bewertung des Wachstums und der Erkennbarkeit auf verschiedenen Materialien	Herstellung der Sporensuspension	
		Konzentration[1] [Sporen/ml] je Röhrchen	Bewertung des Handlings der Sporengewinnung und -zählung
A. niger van Tieghem; DSM 1957	kräftiger schwarzer Bewuchs, makroskopisch sehr gut erkennbar	$7{,}0*10^6$	sehr gute Zentrifugation
C. globosum Kunze: Fries; BAM-ATCC 6205	Erkennbarkeit gut bis sehr gut, wenn Perithezien ausgebildet	$5{,}3*10^6$	großer Biomasserückstand im Filter, gute Zentrifugation, keine augenscheinliche Zerstörung der relativ großen Sporen
C. cladosporioides (Fres.) de Fries ; IHD-3.RV	grünschwarze Kolonie, schlecht erkennbar	$4{,}8*10^6$	großer Biomasserückstand im Filter, gute Zentrifugation
C. herbarum (Pers.) Link; DSM 63 422	Grünschwarze Kolonie, schlecht erkennbar	$3{,}4*10^6$	Zentrifugation mit herkömmlichen Methoden unmöglich
E. herbariorum Link, IHD-6.RV	Hellgelbes Myzel mit graugrünen Konidien und leuchtend gelben Cleistothezien, sehr gut erkennbar	$9{,}8*10^6$	großer Biomasserückstand im Filter, befriedigende Zentrifugation
E. rubrum, DSM 62631	Hellgelbes Myzel mit graugrünen Konidien und leuchtend gelben Cleistothezien, sehr gut erkennbar	$5{,}7*10^6$	sehr gute Zentrifugation
P. funiculosum Thom DSM 1944	makroskopisch sehr gut erkennbar, wenn Bewuchs kräftig	$6{,}7*10^7$	sehr gute Zentrifugation
P. chrysogenum Thom DSM 4164	makroskopisch sehr gut erkennbar, wenn Bewuchs kräftig	$7{,}6*10^6$	Geringe sichtbare Sporulation, gute Zentrifugation
P. expansum IHD-4.RV	Makroskopisch gut erkennbar	$1{,}4*10^7$	Geringe sichtbare Sporulation, gute Zentrifugation
Paecilomyces variotii Bainier DSM 1961	makroskopisch sehr gut erkennbar, wenn Bewuchs kräftig	$2{,}8*10^7$	Hohe sichtbare Sporulation, gute bis sehr gute Zentrifugation
T. viride von Arx, Hainsberg	Makroskopisch sehr gut erkennbar	$1{,}8*10^6$	Geringe sichtbare Sporulation, gute Zentrifugation
T. roseum (Pers.) Link, IHD-6.RV	Lachs- bis rosafarbener Bewuchs , Sehr gut erkennbar	$2{,}4*10^5$	Zentrifugation unmöglich

[1] Gewinnung durch Abschwemmung von einem Reagenzglasröhrchen und Aufnahme nach Abschwemmen und Waschen der Sporen in 50 mL steriler 0,9 %iger Kochsalzlösung, Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Verfahrensanweisung

INSTITUT FÜR HOLZTECHNOLOGIE DRESDEN gGmbH

VA20-24/1
Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen

1 Deskriptoren

Dämmstoffe, Schimmelpilze, Schimmelpilzbeständigkeit, biologische Prüfung

2 Ziel und Zweck der Verfahrensanweisung (VA)

Diese VA beschreibt ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit von Dämmstoffen gegen Schimmelpilzbefall unter Bedingungen, die das Keimen der Sporen und das Schimmelpilzwachstum begünstigen.

Eine Anwendung des Verfahrens für die Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit weiterer Materialien (z. B. Baustoffe, Holz, Holzwerkstoffe und anderen lignocellulosehaltige Materialien, mineralische Werkstoffe, Beschichtungsstoffe u.a.) ist möglich. In diesem Fall obliegen die Entscheidung über die Anwendbarkeit des Verfahrens sowie Festlegungen eventuell notwendiger technischer bzw. methodischer Verfahrensmodifikationen der fachlichen Beurteilung des verantwortlichen Bearbeiters.

3 Vorgehensweise

3.1 Prüfprinzip

Obligatorische Prüfvarianten

Die Prüfung mit Beimpfung beschreibt die biologische Beanspruchung des zu prüfenden Materials (Prüfmaterial) nach einer direkten Beimpfung mit einem definierten Gemisch von Schimmelpilzsporen.

Die Prüfung ohne Beimpfung beschreibt die biologische Beanspruchung des Materials ohne vorherige direkte Beimpfung infolge der Entwicklung von auf dem Material und in der Umgebung auftretenden Schimmelpilzen.

Die biologische Beanspruchung erfolgt unter Bedingungen, die das Auskeimen und Wachsen der Schimmelpilze fördern. Es wird das Ausmaß des Schimmelpilzwachstums nach einer Beanspruchungsdauer von 28 Tagen ermittelt und der Dämmstoff nach festgelegten Kriterien klassifiziert.

Optionale Prüfvariante

Eine optionale Prüfvariante beinhaltet den Zusatz von Nährstoffen. Diese verschärfte Prüfung kann z. B. angewendet werden, wenn die Wirksamkeit eines Fungizids in einem Material nachgewiesen werden soll.

Alterungsbeanspruchung

Eine Alterungsbeanspruchung im Vorfeld einer biologischen Prüfung muss je nach Art und Einsatzbereich der zu prüfenden Materialien festgelegt werden. Bei losen Dämmstoffen kann eine mechanische Beanspruchung durch Simulierung des Einbaus (Aufschütten, Einblasen mit Blasmaschine) und Vibration (Rütteltest analog der Bestimmung des Setzmaßes bei Erschütterung) vorgeschaltet werden. Grundsätzlich ist bei Berücksichtigung einer Alterungsbeanspruchung die jeweilige Prüfvariante auch mit nicht gealtertem Prüfmaterial durchzuführen.

3.2 Arbeitsmittel

3.2.1 Wieder verwendbare Arbeitsmittel

- Prüfbehälter aus Glas oder Kunststoff mit gut schließendem Deckel
- 20 mL Reagenzgläser mit Wattestopfen
- Filtrations-Hilfsmittel
- Klimaprüfkammer oder Brutschrank; (28 ± 2) °C

3.2.2 Nicht wieder verwendbare Arbeitsmittel

- Prüfmaterial (Probe)
- Sporensuspension der Prüfpilze
- Filterpapier (schnell laufend für Suspensionsfiltration)
- Nährmedien (5 % Malzextraktagar)
- Prüfkörper aus Rotbuche (50 x 25 x 15) mm
- Einweg-PP-Kunststoffbecher, Durchmesser ca. 5 cm, Höhe ca. 5 cm

3.3 Zeitplan

Vorbereitung (Erstellung von Prüfplan und Prüfprotokoll, Anzucht der Pilzkulturen für die Sporengewinnung, Vorbereitung der Prüfansätze): 14 Tage

- Biologische Beanspruchung: 28 Tage
- Nachbereitung (Auswertung, Prüfbericht): 1 Tag

3.4 Prüforganismen

Vorbereitung (Erstellung von Prüfplan und Prüfprotokoll, Anzucht der Pilzkulturen für die Sporengewinnung, Vorbereitung (Bezug von anerkannten Stammsammlungen bzw. Prüfinstitutionen, z. B. von der DSMZ- Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, Braunschweig)

- Aspergillus niger
- Trichoderma viride
- Paecilomyces variotii
- Penicillium funiculosum
- Chaetomium globosum

3.5 Herstellung der Sporensuspension

Für die Herstellung der gemischten Sporensuspension aller Prüfpilze gemäß Pkt. 3.4 werden die Pilze als Reinkultur auf Schrägagarröhrchen mit 5 %igem Malzextraktagar im Brutschrank bei (28 ± 2) °C über einen Zeitraum von mindestens 14 und maximal 28 Tagen angezogen. Für die Sporengewinnung sind ausschließlich Kulturen mit arttypischem Wachstum (Myzelfärbung, Sporulierung) zu verwenden.

Bei Festlegung der Anzahl der Vorkulturen ist zu berücksichtigen, dass ein Röhrchen je Prüfpilz (5 Prüfpilze) bei Vorgehen wie nachfolgend beschrieben 250 mL gemischte Sporenlösung ergibt. Wird mehr Lösung benötigt, sind entsprechend mehr Schrägagarkulturen anzulegen.

Die Herstellung der Sporensuspension erfolgt unter sterilen Bedingungen. Zu jeder Pilzkultur (Schrägagarkultur) werden 10 mL von mit 0,05 % Dioctyl-Natriumsulfosuccinat oder Lauryl-Natriumsulfat als Netzmittel versetztem sterilen dest. Wasser zugegeben. Mit einer Impföse oder -nadel wird zur Abtrennung der Sporen vorsichtig über die Oberfläche des Pilzrasens gestrichen. Um die Sporen in eine wässrige Phase zu überführen ohne Nährbodenanteile und Myzelteilchen abzulösen, wird die Flüssigkeit vorsichtig geschüttelt und dann in einen 300 mL Erlenmeyerkolben mit Wattestopfen oder ein anderes geeignetes Gefäß dekantiert. Die Einzelsuspensionen werden kräftig geschüttelt und dann über schnell laufendes Filterpapier filtriert, um Myzel und Nährbodenteilchen sowie Sporenklumpen abzutrennen.

Die Sporen der filtrierten Suspensionen werden in Zentrifugenröhrchen abzentrifugiert (10 min bei 5000 rpm) und die überstehende Flüssigkeit verworfen. Der Rückstand wird in sterilem destilliertem Wasser mit Netzmittel aufgenommen und erneut zentrifugiert. Der nach dem Waschen erhaltene Rückstand wird in steriler 0,9 %iger physiologischer Kochsalzlösung aufgenommen (50 mL je Schrägagarkultur).

Die einzelnen Sporensuspensionen können bis zur Verwendung maximal 7 Tage im Kühlschrank aufbewahrt werden.

Am Tag der Beimpfung werden die Einzelsuspensionen nach Bestimmung der Ausgangskonzentration der Sporen mittels Thoma-Zählkammer auf 1*106 bis 5*106 Sporen je mL verdünnt und im gleichen Volumen-Verhältnis gemischt.

3.6 Herstellung von Vergleichsprüfkörpern

Als Vergleichsprüfkörper für die Klassifizierung gemäß Pkt. 3.10 werden Buchenholzprüfkörper eingesetzt. Geeignet sind Prüfkörper gemäß DIN EN 113. Die Prüfkörper sind vor Einbau 1 Woche bei >95 % rel. Luftfeuchte zu konditionieren. Dies kann durch Exposition über einer freien Wasserphase in einem abgeschlossenen Gefäß im Brutschrank erfolgen. In jeder Prüfserie werden 3 Buchenholzprüfkörper mitgeführt.

3.7 Herstellung von Prüfkörpern

Das zu prüfende Material muss eine repräsentative Mischprobe des zu untersuchenden Dämmstoffs darstellen. Das Material wird vor Verwendung nicht sterilisiert. Für jede Prüfvariante (vgl. Pkt. 3.1) sind mindestens 3 Prüfkörper des zu untersuchenden Materials einzusetzen.

Prüfkörper (PK) von geformten Dämmstoffen, wie Platten, Matten oder Filzen, werden im Format 50 x 50 mm² hergestellt. Bei sehr dicken Materialien, z. B. Fasermatten, werden von der für die Prüfung relevanten Dämmstoffoberfläche PK mit mindestens 20 mm Dicke entnommen. Die Dichte der PK soll der Dichte im Einbauzustand entsprechen.

Die Dichte der PK soll der Dichte im Einbauzustand entsprechen.

Prüfkörper von nicht geformten bzw. losen Dämmstoffen werden durch Einfüllen in perforierte inerte Gefäße, wie z. B. PP-Becher, mit ca. 50 x 50 mm² Prüf-Oberfläche hergestellt. Die Dichte der PK muss der Soll-Dichte im Einbauzustand entsprechen. Dazu ist die Einwaage zu berechnen, die erforderlich ist, um mindestens 20 mm dicke PK herzustellen. Das lose Material ist nach dem Einfüllen entsprechend mit einem Stempel o.ä. leicht zu verdichten und dabei zu egalisieren, wodurch gleichzeitig eine bessere Bewertbarkeit ermöglicht wird.

3.8 Prüfansatz

Die Beimpfung der dafür vorgesehenen Prüfkörper erfolgt durch Besprühen mit der Sporensuspension unter Verwendung einer Feinstrahl-Sprühflasche oder eines Ultraschall-Aerosol-Gerätes (vgl. DIN EN 60068-2-10:2005, Anhang B). Dabei sind geeignete Maßnahmen zum Schutz der Mitarbeiter und der Umwelt zu ergreifen.

Es sind ca. 1 µl Sporensuspension je cm² Prüfkörperoberfläche aufzubringen. Damit werden bei einer Konzentration der eingesetzten Sporensuspension von 106 Sporen/ml ca. 1000 Sporen je cm² Probenoberfläche aufgebracht. Die Vorgehensweise zur Realisierung der Beimpfungsmenge (z. B. Anzahl Sprühstöße mit der Feinstrahl-Sprühflasche oder Expositionszeit im Ultraschallvernebler) ist in Vorversuchen zu testen.

Die Prüfkörper und Kontrollprüfkörper werden auf inerten Abstandshaltern in Prüfgefäße eingebracht, deren Boden etwa 2 cm hoch mit Leitungswasser bedeckt ist. Als Prüfgefäße sind z. B. 1-Liter-Gläser mit Deckel oder PE-Schalen mit Deckel geeignet. Es können mehrere Proben in ein Prüfgefäß verbracht werden. Allerdings sind für beimpfte und unbeimpfte Prüfkörper separate Gefäße vorzusehen und die einzelnen Parallelproben eines Produktes sind auf verschiedene Prüfgefäße zu verteilen.

3.9 Inkubation

Die Prüfgefäße werden bei (28 ± 2) °C über einen Zeitraum von 28 Tagen inkubiert. Innerhalb des Prüfzeitraums ist regelmäßig der Wasserstand in den Prüfgefäßen zu kontrollieren und ggf. mit Leitungswasser aufzufüllen.

3.10 Auswertung der Prüfung

Unmittelbar nach Prüfende werden die Prüfkörper ausgebaut. Eine Prüfserie ist auswertbar, wenn mindestens 50 % der Oberfläche der Vergleichsprüfkörper aus Buchenholz visuell ohne Hilfsmittel sichtbar bewachsen ist. Das Schimmelpilzwachstum auf den Prüfkörpern wird durch eine makroskopische und mikroskopische Begutachtung bewertet. Jede Prüfkörperbewertung erfolgt bei gleichzeitiger Begutachtung des originalen unbeanspruchten Dämmstoffmaterials. Es sind ausschließlich die Oberflächen bzw. Oberseiten der Prüfköper zu bewerten.

Bonitierungsschlüssel:

0 kein Schimmelpilzbewuchs auf der Prüfkörperoberfläche bei Betrachtung im Auflichtmikroskop bei 50-facher Vergrößerung

1 Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge nicht oder nur schwer, bei 50-facher Vergrößerung jedoch deutlich zu erkennen

2 Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge deutlich zu erkennen - deutlich schwächer als auf den Vergleichsprüfkörpern

3 Schimmelpilzbewuchs mit bloßem Auge deutlich zu erkennen - gleich stark oder stärker als auf den Vergleichsprüfkörpern

Zur Auswertung der Prüfung sind die Bonitierungsstufen der einzelnen Parallelproben arithmetisch zu mitteln und auf eine ganze Zahl zu runden.

Eine Klassifizierung der geprüften Materialien hinsichtlich Schimmelpilzbeständigkeit erfolgt ausschließlich auf Grundlage der mittleren Bonitierungswerte, getrennt für die Prüfung mit und ohne Beimpfung. Zugrunde gelegt wird jeweils die Prüfvariante mit der schlechteren Bewertung.

Klassifizierung von Dämmstoffen hinsichtlich Schimmelpilzbeständigkeit

Bonitierungsstufe	Klassifizierung	Eignung
0	beständig	ohne Einschränkung
1	beständig	ohne Einschränkung
2	mäßig beständig	mit Auflagen
3	nicht beständig	nicht geeignet

3.11 Erstellung des Prüfberichtes

Die spezifischen Angaben zur Durchführung der Prüfung müssen folgende Informationen umfassen:

- Bezeichnung des Prüfverfahrens
- Prüfmaterial
- Verwendete Prüfkulturen mit Stammbezeichnung
- Kultivierungsbedingungen
- Angabe aller von der VA-20-25/1 abweichenden Prüfbedingungen

Die Prüfergebnisse in Form der vergebenen gemittelten Bonitierungskennzeichnung und der Klassifizierung sind unter Angabe der Bewertungs- und Klassifizierungskriterien in tabellarischer Form darzustellen.

3 Teilvorhaben 3a: Untersuchungen zur Optimierung des Brandverhaltens unter besonderer Berücksichtigung von Wärmeleitfähigkeit und Materialfeuchte

3.1 Einleitung, Problem- und Zielstellung

Der Brandschutz hat bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen eine besondere Bedeutung, da die Grundstoffe dieser Dämmstoffe organisch sind. Eine ähnlich wichtige Rolle spielt der Schutz gegenüber Feuchtigkeit, weil sonst die Materialien einem möglichen Angriff von Schimmelpilzen ausgesetzt sein könnten.

Um den Brandschutz gewährleisten zu können werden die unterschiedlichsten Substanzen den Dämmstoffen zugesetzt. Es werden vor allem anorganische Salze verwendet die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung ein Verbrennen der Materialien verzögern. Zur Verwendung kommen vor allem Borsalzverbindungen, die eine lange Tradition in der Anwendung als Brandschutzmittel haben. Verwendet werden zudem je nach Dämmstoffgrundmaterial auch Ammoniumphosphat, Kalk, Tonerde, Natriumsilikat, Molke, Soda sowie Harnstoff und andere Verbindungen.

Alle diese Verbindungen bringen ihre Eigenschaften mit in den Dämmstoff ein. Sie können somit die Isoliereigenschaften des Dämmstoffes verändern. Genannt werden hier immer wieder ein möglicher Einfluss durch eine stärkere Feuchtigkeitsaufnahme durch den meist hydrophoben Charakter der Brandschutzsalze, sowie eine Schimmelpilzwachstum hemmende Wirkung durch die Veränderung des osmotischen Milieus des Dämmstoffes und damit einer schlechteren Verfügbarkeit durch die Mikroorganismen.

Bisher sind hierzu noch keine aussagekräftigen Untersuchungen gemacht worden. Im Vordergrund stand vor allem die Einhaltung der Tests für den Brandschutz, da dieser von besonderer Bedeutung ist. Die anderen Nebeneffekte wurden nicht besonders berücksichtigt.

Um hier etwas Klarheit zu schaffen, wurden in den Untersuchungen die Wirkungen von unterschiedlichen Brandschutzsalzen sowie unterschiedliche Konzentrationen von ihnen in verschiedenen Dämmstoff-Grundmaterialien untersucht. Getestet werden soll zum einen der Einfluss der Brandschutzsalze auf die Wärmeleitfähigkeit, als auch die mögliche Veränderung des Feuchtigkeitsverhaltens und damit auch der Einfluss auf ein Wachstum von Schimmelpilzen. Getestet werden Fasern von Materialien, die den Hauptanteil der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen stellen; dies sind Cellulose, Holzfasern, Flachsfasern, Hanffasern und Holz-Hobelspäne. Getestet werden die Brandschutzsalze Borat, Ammoniumphosphat und Natriumsilikat.

Das Ziel der Untersuchungen ist eine mögliche Quantifizierung der Einflüsse der Brandschutzsalze sowie eine hieraus ableitbare Veränderung in den Konzentrationen und Zusammensetzungen für eine mögliche Reduzierung der Mengen, sowie der Verwendung von umweltschonenden Verbindungen mit gleichen Eigenschaften.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Auswahl der Produkte und Materialien

Um eine spätere Verbindung mit den von den verschiedenen Teilvorhaben vorgenommen Untersuchungen zu ermöglichen, wurde vor Beginn der Untersuchungen eine Produktauswahl in Zusammenarbeit mit dem Projektträger (FNR) erstellt. In Tabelle 1 sind die Produkte aufgeführt, die vom Institut für Betriebstechnik und Bauforschung im Teilvorhaben 3a „Untersuchungen zur Optimierung des Brandverhaltens unter besonderer Berücksichtigung von Wärmeleitfähigkeit und Materialfeuchte“ untersucht wurden. Hierbei wurde darauf geachtet sowohl die vor allem nachgefragten Dämmstoffe (z. B. aus Cellulose, Flachs und Hanf) zu untersuchen, als auch Produkte die erst seit kurzem auf dem Markt sind wie z. B. Seegras.

Tabelle 45: Zusammenstellung der untersuchten Produkte

	Anonymisierte Produktbezeichnung
1	Flachs-Matte K
2	Flachs-Matte G
3	Hanf-Matte AF
4	Hanf-Wolle L
5	Cellulose-Einblasdämmstoff Q
6	Cellulose-Einblasdämmstoff (B)
7	Cellulose-Platte M
8	Holzspan-Schüttung B
9	Holzfaser-Platte M
10	Roggen-Schüttung W
11	Schafwoll-Matte A
12	Seegras-Schüttung X

Neben diesen Produkten wurden Rohmaterialien zur Herstellung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, die mit verschiedenen Konzentrationen (5, 10, und 15 Gew. %) an Brandschutzsalzen (Borsalze, Ammoniumphosphat und Natriumsilikat) beaufschlagt wurden untersucht. Bei diesen Materialien handelte es sich um Flachs, Hanf, Holzfasern, Holzhobelspäne und Cellulose.

3.2.2 Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit

3.2.2.1 Messmethode

Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wird meist mit dem Standard-Plattenverfahren nach DIN 12 667 (Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät) gemessen. Bei dem für die Untersuchungen verwendeten Messgerät (siehe Bild 60) handelte es sich um Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät. Es ist kein Wärmestrommessplattengerät und hat somit eine höhere Messgenauigkeit. Die Ausführung des Gerätes ermöglicht es auf eine Messkammer zu verzichten und sichert somit eine einfache Handhabung bei der Bedienung.

Bild 60: Wärmeleitfähigkeitsmessgerät

Das Messprinzip beruht auf dem Erstellen eines Temperaturgradienten mit parallelen Temperaturlinien zwischen einer Heiz- und einer Kühlplatte zwischen denen die Probe liegt (siehe Bild 61).

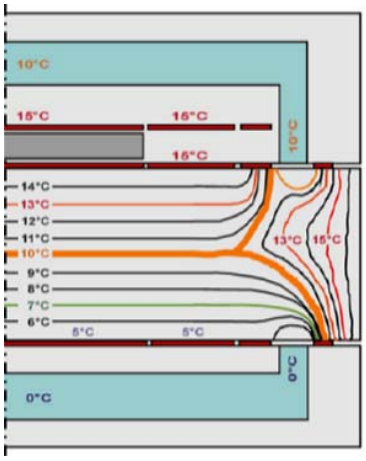


Bild 61: Verlauf des Temperaturgradienten in der Probe

Ein Plattengerät (guarded hot plate), wie das verwendete Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät, misst die Energie, die bei den Oberflächentemperaturen und der Probendicke durch die Probe fließt und berechnet aus diesen Werten stoff- und dickenunabhängig die Wärmeleitfähigkeit (thermal conductivity) bzw. den Wärmedurchlasswiderstand (thermal resistance) und damit den k-Wert bzw. den U-Wert. Es muss nicht kalibriert werden (siehe dazu EN 12667 Seite 19 Punkt q) und ist so langzeitstabil, dass auch nach Jahren keine Abweichungen feststellbar sind. Die obere Platte der Anlage wird vor der Messung nach unten gefahren. Sie enthält sowohl eine kalibrierte Entfernungsmessung zur Bestimmung der Materialdicke, als auch eine Messvorrichtung für den Auflagedruck. Das Gerät wird über einen PC gesteuert und ermöglicht so eine ständige Kontrolle des Messverlaufes. Zudem enthält das Programm eine Datenbank zur schnelleren Auswertung der Messungen (siehe Bild 62).

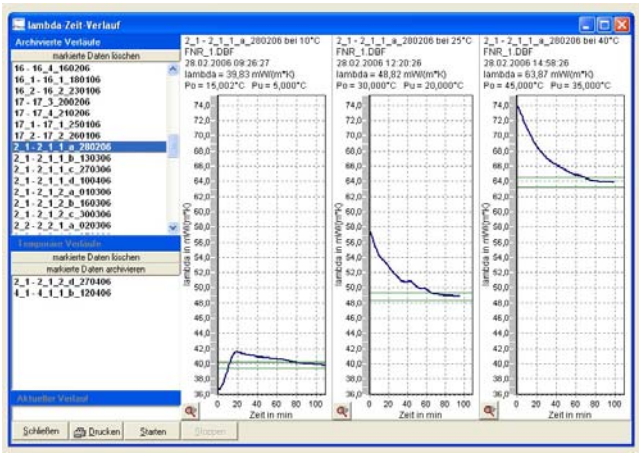


Bild 62: Screenprint des Steuerungsprogramms

Die Proben wurden vor dem Beginn der Messungen bei 70 °C getrocknet und dann in einen luftdichten Plastiksack verpackt, um eine Auffeuchtung der Proben währen der Messung zu vermeiden. Die Proben wurden bei Mitteltemperaturen von 5, 20 und 35 °C gemessen (siehe Bild 62). Sobald die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit unter 1 % über 30 min fiel, würde auf die nächste Temperatur umgestellt oder der Versuch beendet. Von jedem Probenmaterial wurden 5 Messungen gemacht.

3.2.2.2 Probenvorbereitung

Aufgrund der Vorgaben der Abmessungen des Messgerätes hatten die festen Dämmstoffe (s. Bild 63) Abmessungen von (500 ± 5 x 500 ± 5 mm). Die Dicken wurden durch die Produktstärken vor gegebenen. Die losen Dämmstoffe sowie die Ausgangsmaterialien mit den unterschiedlichen Brandschutzsalzkonzentrationen wurden in einem Rahmen aus Schaumstoff gemessen (siehe Bild 64). Aufgrund der Weichheit dieses Rahmens lies sich die Dicke des Materials und damit die notwendige Dichte einstellen. Eingestellt wurde jeweils auf die Dichtevorgaben der Hersteller.

Bild 63: Flachsmatte K

Bild 64: Roggen-Schüttung W

Die Vorbereitung der Grundmaterialien mit einer Beaufschlagung mit verschiedenen Brandsalzkonzentrationen wurde wie folgt vorgenommen. Die Materialien wurden mit einer wässrigen Lösung der jeweiligen Salze besprüht. Ausgehend von einer bestimmten Menge an getrocknetem Dämmmaterial (bei 60 °C) wurde die Lösung mit einem handelsüblichen Sprüher aufgetragen. Aufgrund der unterschiedlich aufzutragenden Flüssigkeitsmengen, wurden die Materialien zwischendurch immer wieder gemischt und falls notwendig bei 60 °C schonend getrocknet. Aus den Konzentrationen der Lösungen und der vorgegebenen Mengen an Dämmmaterial lies sich die Menge der aufzusprühenden Lösungen berechnen. Am Ende des Besprühens wurden die Probenmaterialien bei 60 °C getrocknet. Es wurde für alle Versuche ausreichend Probenmaterial hergestellt, um eine Vergleichbarkeit zu erhalten. Die so vorbereiteten Probenmaterialien wurden in den Dichten verwendet wie Produkte aus diesen Materialien. Es wurden Dichten von etwa 60 kg/m³ verwendet.

3.2.2.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der getesteten Materialien und Produkte sind in Tabelle 46 dargestellt. Wie zu erwarten lagen die Messungen in den Bereichen, die von den Herstellern angegeben sind. Die Werte liegen für die verschiedenen Produkte im Bereich von 0,33 W/mK für die Flachs-Matte K bis zu 0,052 W/mK für die Roggenschüttung.

Tabelle 46: Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Produkte

	Material	**Wärmeleitfähigkeit (W/mK)**
1	Flachs-Matte K	**0,033**
2	Flachs-Matte G	**0,039**
3	Hanf-Matte AF	**0,037**
4	Hanf-Wolle L	**0,048**
5	Cellulose-Einblas-	**0,041**

	Material	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
	dämmstoff Q	
6	Cellulose-Einblasdämmung M	**0,042**
7	Cellulose-Platte M	**0,041**
8	Holzspan-Schüttung B	**0,041**
9	Holzfaser-Platte M	**0,037**
10	Roggen-Schüttung W	**0,052**
11	Schafwoll-Matte A	**0,032**
12	Seegras-Schüttung X	**0,051**

Die Messergebnisse für die mit verschiedenen Brandschutzsalzen beaufschlagten Ausgangsmaterialien stellen sich wie folgt da (siehe Tabelle 47).

Tabelle 47: Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Fasern mit unterschiedlichen Brandschutzsalzen und Brandschutzsalzmengen (Angabe der Wärmeleitfähigkeit in W/mK)); Mittelwerte aus 5 Messungen

Brandschutzmittel	Gehalt (Gew. %)	Flachsfasern	Hanffasern	Holzfasern	Holz-Hobelspäne	Cellulose
	0	**0,032**	**0,037**	**0,042**	**0,043**	**0,042**
Borsalz	**5**	**0,033**	**0,037**	**0,041**	**0,043**	**0,042**
Borsalz	**10**	**0,032**	**0,036**	**0,041**	**0,042**	**0,041**
Borsalz	**15**	**0,031**	**0,036**	**0,040**	**0,042**	**0,040**
Ammoniumphosphat	**5**	**0,033**	**0,038**	**0,044**	**0,044**	**0,043**
Ammoniumphosphat	**10**	**0,033**	**0,038**	**0,043**	**0,042**	**0,042**
Ammoniumphosphat	**15**	**0,032**	**0,036**	**0,042**	**0,042**	**0,042**
Natriumsilikat	**5**	**0,032**	**0,038**	**0,044**	**0,044**	**0,043**
Natriumsilikat	**10**	**0,032**	**0,036**	**0,043**	**0,043**	**0,042**
Natriumsilikat	**15**	**0,031**	**0,036**	**0,042**	**0,042**	**0,041**

Bei den Rohmaterialien stellen sich die Flachsfasern als die mit den besten isolierenden Eigenschaften dar, gefolgt von den Hanffasern und den anderen Materialien. Die Materialien wurden mit 3 verschiedenen Brandschutzmitteln beaufschlagt, in 3 verschiedenen Konzentrationen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei getrockneten Proben, sich die Menge der Brandschutzsalze nur sehr wenig auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt. Es erfolgt lediglich eine Veränderung von 3 bis 5 %, was eigentlich im Genauigkeitsbereich des Messinstrumentes liegt. Bei den Brandschutzsalzen zeigen Borsalz und Natriumsilikat ein ähnliches Verhalten. Die Werte für Ammoniumphosphat liegen etwas höher.

3.2.3 Untersuchung des Feuchtigkeitsverhaltens

3.2.3.1 Bestimmung der Ausgleichsfeuchte nach DIN EN 12429

3.2.3.1.1 Messmethode

Untersucht wird die Feuchtigkeitsaufnahme bei (23 ± 2 °C) und einer rel. Luftfeuchtigkeit von (50 ± 5 %). Die Untersuchungen erfolgten in einer Klimakammer. Der Probenkörper wird nach EN ISO 12570 bis zur Massenkonstanz getrocknet. Diese gilt als erreicht, wenn die Änderung der Masse dreier aufeinander folgenden Wägungen, die in min. 24 h Abstand durchgeführt wurden, weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt, dann wird der Probenkörper in die Klimakammer eingebracht. Der Probenkörper wird in der Kammer periodisch gewogen, bis er im Gleichgewichtszustand mit der Umgebung (Massenkonstanz) ist. Von jedem Material wurden 5 Parallelen untersucht.

3.2.3.1.2 Probenvorbereitung

Die Proben aus festem Material hatten Abmessungen von (200 ± 2 x 200 ± 2 mm) (siehe Bild 65). Die Dicken wurden durch die Produktstärken vor gegebenen (siehe Bild 66).

Bild 65: Unterschiedlichen Proben (senkrechte Aufnahme)

Bild 66: Unterschiedliche Proben (seitliche Aufnahme)

Für die losen Schüttungen und Fasern wurden Drahtboxen aus engmaschigem Kaninchendraht hergestellt, der mit Fliegengitter bespannt wurde, um auch feinere Partikel zurückhalten zu können (siehe Bild 67 und Bild 68). Eingewogen wurde soviel Material, dass es der zu verwendenden Dichte laut Hersteller entsprach.

Auch die vorbereiteten, mit Brandschutzsalzen beaufschlagten Dämmmaterialien, wurden in den Dichten verwendet wie Produkte aus diesen Materialien. Es wurden Dichten von etwa 60 kg/m³ verwendet.

Bild 67: Holzspan-Schüttung B (senkrechte Aufnahme)

Bild 68: Holzspan-Schüttung B (seitliche Aufnahme)

3.2.3.1.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse von den untersuchten Produkten sind in Tabelle 48 dargestellt. Die Ausgleichsfeuchten zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den verschiedenen Materialien. Besonders bei den Cellulose-Einblasdämmstoffen ist ein großer Unterschied sichtbar, er reicht von 13,52 bis 8,66 %. Dies ist auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Produkte sowie den Ausgangsmaterialien zurückzuführen. Des weiteren weißt das Schafwoll-Produkt einen höheren Feuchtigkeitsgehalt auf. Grund hierfür ist die chemische Zusammensetzung der Fasern. Schafwolle besteht aus Protein, wogegen pflanzliche Fasern (wie Flachs, Hanf etc.) aus Polysacchariden bestehen. Schafwolle ist allgemein dafür bekannt, dass sie mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann als viele andere Dämmstoffe. Die niedrige Ausgleichsfeuchte der Flachs-Matte G liegt an den darin verarbeiteten Kunststofffasern, die keine Feuchtigkeit aufnehmen, ähnliches gilt für die Cellulose-Platte M. Das die Seegrasschüttung so niedrig liegt, lässt sich damit begründen, dass es sich hierbei um ganze Pflanzen handelt, die nur zerkleinert worden sind und nicht um aufgeschlossene Pflanzenteile wie die Fasern. Hierdurch ergibt sich eine kleinere Sorptionsoberfläche als bei den Fasermaterialien. Aufgrund ihrer Lebensweise in Salzwasser und dem damit verbundenen höheren Salzgehalt innerhalb der Pflanze, können sie auch ein anderes Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten haben, als die Landpflanzen. Die Roggen-Schüttung konnte nicht ausgewertet werden, da zu viele der kleinen Partikel auch durch die feinmaschigen Fliegengitter gefallen sind.

Tabelle 48: Ausgleichsfeuchte der verschiedenen Produkte

	Material	**Ausgleichsfeuchte (23 °C; 50 % rel. Luft-feuchtigkeit)**
1	Flachs-Matte K	**8,03**
2	Flachs-Matte G	**5,75**
3	Hanf-Matte AF	**7,41**
4	Hanf-Wolle L	**9,14**
5	Cellulose-Einblasdämm-stoff Q	**13,52**
6	Cellulose-Einblasdämm-stoff M	**8,66**
7	Cellulose-Platte M	**6,27**
8	Holzspan-Schüttung B	**9,45**
9	Holzfaser-Platte M	**6,05**
10	Schafwoll-Matte A	**10,39**
11	Seegras-Schüttung X	**6,54**

Bei den untersuchten Ausgangsmaterialien (siehe Tabelle 49) zeigen die Holzfasern die höchsten Werte. Am wenigsten nehmen die Holz-Hobelspäne auf. Das mag vor allem an der geringeren Sorptionsoberfläche der Hobelspäne beruhen. Die anderen Fasern nehmen ohne Brandschutzsalze zwischen 10,5 (Flachsfasern) und 13,0 % (Hanffasern) Feuchtigkeit auf. Die Brandschutzsalze bewirken eine erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme bei den Materialien. Bei Borsalz ergibt sich eine Erhöhung der Feuchtigkeit von ca. 10 bis 18 % bei einer Brandschutzsalzmenge von 15 Gew. %. Ähnliches gilt für das eingesetzte Natriumsilikat. Etwas höher ist der Anstieg bei Ammoniumphosphat. Dies scheint etwas hygroskopischer zu sein als die anderen Salze.

Tabelle 49: Ausgleichsfeuchte von verschiedenen Fasern mit unterschiedlichen Brandschutzsalzen und Brandschutzsalzmengen; Mittelwerte aus 5 Messungen

Brandschutzmittel	Gehalt (Gew. %)	Flachsfasern	Hanffasern	Holzfasern	Holz-Hobel-späne	Cellulose
	0	10,5	13,0	13,5	8,6	11,2
Borsalz	5	11,2	13,4	13,7	9,2	11,5
Borsalz	10	11,8	13,9	14,3	9,6	12,2
Borsalz	15	12,3	14,4	15,0	10,4	12,7
Ammoniumphosphat	5	11,5	14,0	14,2	9,4	11,7
Ammoniumphosphat	10	12,2	14,7	14,9	10,2	12,5
Ammoniumphosphat	15	13,0	15,4	15,4	10,6	12,9
Natriumsilikat	5	10,9	13,5	13,8	9,3	11,2
Natriumsilikat	10	11,6	14,2	14,6	9,8	11,6
Natriumsilikat	15	12,2	14,6	15,1	10,4	12,3

3.2.3.2 Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten

3.2.3.2.1 Messmethode

Die Untersuchungen dienen der Bestimmung der von den verschiedenen Materialien unter unterschiedlichen Klimabedingungen aufgenommenen Feuchtigkeitsmengen. Untersucht wurde der Temperaturbereich von 5 bis 30 °C sowie die Luftfeuchtigkeiten von 40 bis 95 %. Die Untersuchungen erfolgten in einer Klimakammer. Es wurde mit den Messungen bei der niedrigsten Temperatur und der niedrigsten rel. Luftfeuchtigkeit begonnen. Der Probenkörper wird periodisch in der Klimakammer gewogen, bis die Massenkonstanz eintritt. Diese gilt als erreicht, wenn die Änderung der Masse dreier aufeinander folgender Wägungen in 24 h weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt.

3.2.3.2.2 Probenvorbereitung

Die Proben aus festem Material hatten Abmessungen von (200 ± 2 x 200 ± 2 mm). Die Dicken wurden durch die Produktstärken vor gegebenen. Für die losen Schüttungen und Fasern wurden Drahtboxen aus engmaschigem Kaninchendraht hergestellt, der mit Fliegengitter bespannt wurde, um auch feinere Partikel zurückhalten zu können. Eingewogen wurde soviel Material, dass es der zu verwendenden Dichte laut Hersteller entsprach. Auch die vorbereiteten, mit Brandschutzsalzen beaufschlagten, Dämmmaterialien wurden in den Dichten verwendet, wie Produkte aus diesen Materialien. Es wurden Dichten von etwa 60 kg/m³ verwendet.

3.2.3.2.3 Versuchsergebnisse

In den folgen Tabellen sind die Ergebnisse von ausgesuchten Materialien dargestellt. Die Tabellen der übrigen Produkte sind im Anhang aufgeführt. Unter den Produkten zeigt die Schafwoll-Matte A die höchste Feuchtigkeitsaufnahme. Sie erreicht bei 30 °C und 95 % rel. Luftfeuchtigkeit einem Wert von 31,1 % (siehe Tabelle 50). Am Wenigsten wird von der Cellulose-Platte M (22,3 %) (siehe Tabelle 51) aufgenommen. Die anderen Produkte liegen in einem Bereich von 22,5 % (Seegras-Schüttung X), 23,4 % (Cellulose-Einblasdämmstoff Q), 24,1 % (Cellulose-Einblasdämmstoff M), 25,1 % (Flachs-Matte K), 25,1 % (Holzfaser-Platte M), 25,3 % (Hanf-Matte AF), 25,6 % (Flachs-Matte G), 25,8 % (Holzspan-Schüttung B) und 27,1 % (Hanf-Wolle L) (siehe Tabelle 53 - Tabelle 61 im Anhang).

Tabelle 50: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.-%) von Schafwoll-Matte A in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur / rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,5	8,7	9,0	9,5	9,9	10,5
55 %	10,1	10,4	10,9	11,5	12,1	12,8
70 %	12,2	12,7	13,1	13,8	14,7	16,0
80 %	15,8	16,6	18,1	19,0	20,2	21,4
90 %	21,0	21,8	22,7	24,1	25,5	26,7
95 %	26,3	27,4	28,6	29,4	30,2	31,1

Tabelle 51: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulose-Platte M in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur / rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	5,1	5,4	5,9	6,4	7,0	7,3
55 %	6,9	7,2	7,5	7,9	8,3	8,8
70 %	8,2	8,5	9,0	9,6	10,4	11,3
80 %	10,9	11,5	12,4	13,5	14,6	16,2
90 %	15,6	16,3	17,0	17,9	18,6	19,2
95 %	19,2	19,9	20,5	21,1	21,6	22,3

Hierbei zeigt sich auch wieder die höhere Feuchtigkeitsspeicherung der Wollfaser, sowie dass andere Feuchtigkeitsverhalten der Seegras-Schüttung.

Da sich die Menge der beaufschlagten Brandschutzsalze am Stärksten bei hohen Temperaturen und rel. Luftfeuchtigkeiten auswirkt, sollen die Ergebnisse der Untersuchungen vor allem an den Feuchtigkeitsaufnahmen unter diesen Bedingungen ausgewertet werden (siehe Tabelle 52). Die Tabellen mit den vollständigen Ergebnissen der anderen Materialien (Tabelle 62 - Tabelle 111) sind im Anhang zu finden. Bei den hohen Luftfeuchtigkeiten zeigen die Holzfasern ohne Brandschutzsalze eine besonders hohe Feuchtigkeitsaufnahme (30,2 %). Am wenigsten nehmen die Holz-Hobelspäne auf. Mit zunehmendem Brandschutzsalzgehalt steigen die Feuchtigkeitsgehalte aufgrund der Hygroskopizität der Verbindungen. Bei 15 Gew. % Borsalz steigt die Feuchtigkeit in den Proben zwischen 10 % bei den Holzfasern bis 23 % bei den Holz-Hobelspänen. Ähnliche Werte zeigen sich bei Natriumsilikat. Ammoniumphosphat bewirkt eine noch etwas höhere Feuchtigkeitsaufnahme, wie schon bei der Ausgleichsfeuchte zu sehen war.

Tabelle 52: Feuchtigkeitsaufnahme von verschiedenen Fasern mit unterschiedlichen Brandschutzsalzen und Brandschutzsalzmengen (Feuchte bei 30°C und 95 % rel. Luftfeuchtigkeit); (Angabe der aufgenommenen Feuchtigkeit in Gew. %)

Brandschutzmittel	Gehalt (Gew. %)	Flachsfasern	Hanffasern	Holzfasern	Holz-Hobelspäne	Cellulose
	0	23,9	26,1	30,2	21,6	27,5
Borsalz	5	24,0	26,4	30,5	22,8	28,4
Borsalz	10	25,4	27,7	31,9	24,2	29,7
Borsalz	15	26,7	28,7	33,2	26,4	31,9
Ammoniumphosphat	5	24,8	26,6	31,0	23,6	29,2
Ammoniumphosphat	10	26,3	28,3	32,3	25,5	30,6
Ammoniumphosphat	15	27,8	30,1	33,9	27,6	32,4
Natriumsilikat	5	24,2	26,1	30,6	23,3	28,8
Natriumsilikat	10	25,5	27,9	31,7	24,6	30,0
Natriumsilikat	15	26,8	29,0	33,5	26,1	31,9

Neben der Messung der Feuchtigkeit erfolgte eine Kontrolle der Proben auf das Wachstum von Schimmelpilzen. Für das Wachstum von Mikroorganismen - allgemein - sind bestimmte Voraussetzungen notwendig (DALLWITZER und BIEHLER, 1998; SENKPIEL, OHGKE und BECKERT, 1994). Zum einen muss das Vorhandensein dieser Organismen (z. B. als Dauerform/Sporen) gegeben sein und es müssen zum anderen die für ein Wachstum grundlegenden Umweltbedingungen herrschen (HANNENHEIM von, 1998). Mikroorganismen wie Pilze und Bakterien benötigen für ihr Wachstum und ihre Vermehrung allgemein Temperaturen über 0 °C, die Gegenwart von Wasser und Nährstoffen sowie verschiedenen „Spurenelementen“ (STEINERT, DRAEGER und PAULMANN, 1981; SENKPIEL, OHGKE und BECKERT, 1991). Das Temperaturoptimum und der Nährstoffbedarf dieser Organismen ist von Art zu Art unterschiedlich, so dass sich je nach Umweltbedingungen unterschiedliche Populationszusammensetzungen ergeben (BECKER, 1987).

Da Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen auf Grund ihres Ursprungs (Pflanzenteile, Tierhaare) viele komplexe organische Verbindungen enthalten, ist davon auszugehen, dass eine Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen als gesichert anzusehen ist. Als weitere Quellen für mögliche Nährstoffe kommen Verbindungen, die durch den Produktionsprozess in die Dämmstoffe mit eingetragen oder eingebracht werden (Bindemittel etc.) sowie organische Substanzen, die aus der Umgebungsluft in den Dämmstoff diffundieren, in Betracht. Man kann also davon ausgehen, dass die Dämmstoffe eine ausreichende Nährstoffbasis für Mikroorganismen bieten.

Bei den Umweltbedingungen sieht es etwas anders aus. Die Schnelligkeit des Wachstums von Mikroorganismen ist stark von der Temperatur abhängig. Jeder Organismus besitzt ein so genanntes Temperaturoptimum bei

welchem er sich am schnellsten vermehrt (ausgehend von einer optimalen Nährstoffversorgung). Bakterien (z. B. Escherichia coli) erreichen hierbei eine Verdopplungszeit von ca. 20 Minuten. Das Temperaturoptimum für die meisten Pilze und Bakterien liegt etwa zwischen 20 und 30 °C. Jedoch ist ein, wenn auch eingeschränktes Wachstum bis 0 °C (z. B. das Verschimmeln von Nahrungsmitteln in Kühlschränken) möglich. Das Problem, was Mikroorganismen im unteren Temperaturbereich haben, ist eine ausreichende Verfügbarkeit von Wasser. Ohne freies Wasser findet kein Wachstum bzw. keine Vermehrung statt. Mikroorganismen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ansprüche an den Wassergehalt ihrer Umgebung relativ stark. Um wässrige Lösungen oder Feststoffe bezüglich des verfügbaren Wassers vergleichen zu können, bedient man sich der Parameter Wasseraktivität (a_w) oder relative Feuchtigkeit. Diese Parameter beziehen sich auf die Dampfphase, die sich mit festen Materialien oder einer Lösung im Gleichgewicht befindet. Sie geben den Quotienten aus der Konzentration an Wasser in der Dampfphase im Luftraum über dem Material und der Wasserkonzentration im Luftraum über reinem Wasser bei einer bestimmten Temperatur an (SCHLEGEL, 1981). Mikroorganismen wie Pilze benötigen im Allgemeinen eine Wasseraktivität von über 0,8. Ist genügend Feuchtigkeit vorhanden, z. B. Kondensatflecken an Decken und Wänden, kommt es auch unter sonst widrigen Bedingungen, wie geringe Temperaturen, zum Wachstum von vor allem Schimmelpilzen (Penicillium- und Aspergillusarten). Problematisch ist die Bestimmung des Übergangs von gebundenem zu freiem Wasser, welches den Mikroorganismen zur Verfügung steht. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen haben einen zu starken hydrophoben Charakter, der auf eine starke Bindung des Wassers in den Fasern schließen lässt. Dies könnte bedeuten, dass Mikroorganismen auf diesen Materialien ständig unter Wassermangel zu leiden haben, wenn es nicht durch hohe Luftfeuchtigkeiten zu einer Sättigung der Faser mit Feuchtigkeit kommt.

Die Kontrolle der Proben erfolgte optisch. Es zeigte sich, dass sich lediglich bei sehr hohen Luftfeuchtigkeiten und hohen Temperaturen ein Schimmelwachstum einstellte. Zudem zeigte sich, dass auch eine steigende Brandschutzsalzkonzentration nicht den entscheidenden Einfluss auf das Wachstum hat. Ein Wachstum wird nicht vollständig verhindert, es wird lediglich etwas reduziert. Hierbei gab es zwischen den untersuchten Brandschutzsalzen keinen signifikanten Unterschied.

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen benötigen aufgrund ihrer organischen Struktur einen zusätzlichen Brandschutz, um die gesetzlichen Auflagen zu erfüllen. Dieser Brandschutz kann je nach Grundmaterial für den Dämmstoff unterschiedlich aussehen. Meist handelt es sich jedoch um anorganische Salze wie z. B. Borverbindungen. Diese Verbindungen haben jedoch einen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften der Dämmstoffe. Sie bewirken meist aufgrund ihres hygroskopischen Charakters ein Auffeuchten der Dämmstoffe. Die Auffeuchtung ist mehr oder weniger stark. Eine erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme der Dämmstoffe könnte zu einem verstärkten Wachstum von Mikroorganismen, vor allem Pilzen führen, die eine Schädigung der Struktur der Dämmstoffe hervorrufen könnten. Dies würde möglicherweise zu einer Reduzierung der Isolierung führen und auch zu ei-

ner gesundheitlichen Gefährdung der Bewohner der Gebäude bei Freiwerden der Pilzsporen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, das sich die Wärmeleitfähigkeit nur wenig durch die Zugabe von Brandschutzsalzen verändert, wenn die Proben in getrocknetem Zustand gemessen werden. Die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit ist bei allen 3 getesteten Brandschutzsalzen (Borat, Ammoniumphosphat und Natriumsilikat) in etwa gleich und liegt im Bereich der Messgenauigkeit des verwendeten Messgerätes. Des weiteren ist hier die aufgrund der Verarbeitung vorhandene Inhomogenität der Materialien zu erwähnen. Die Zusammensetzung und Verteilung der Fasern innerhalb der Proben ist nicht einheitlich, sodass mit Schwankungen bei den Messungen zu rechnen ist, deshalb wurden für die Messungen auch jeweils 5 Parallelen gemessen. Die Verteilung der Messungen lag nahe der Verteilung der Mittelwerte. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit zumindest von den verwendeten Brandschutzsalzen kaum verändert wird.

Anders sieht es bei dem Einfluss auf das Feuchtigkeitsverhalten aus. Hier kommt es bei hohen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten (30 °C; 95 % rel. Luftfeuchtigkeit) zu einer erhöhten Aufnahme von Wasser. Es werden bis zu 23 % mehr, gegenüber den unbehandelten Proben, aufgenommen. Dies war bei den Holz-Hobelspan-Proben zu beobachten. Bei den anderen Materialien lagen die Werte zwischen 10 und 18 %. Bei den Brandschutzsalzen zeigte sich bei Ammoniumphosphat eine leicht erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme gegenüber bei Borat und Natriumsilikat. Diese Feuchtigkeit führt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, wobei noch zu klären ist wie hoch diese ist und in welchem Verhältnis sie zu der erhöhten Feuchtigkeit steht. Hier könnte das Projekt des WKI (Schnelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen – Abhängigkeit von Materialfeuchte und Dichte) Aufschluss geben.

Die parallel hierzu durchgeführten Kontrollen auf Schimmelpilzwachstum lassen erkennen, dass sich ein Wachstum nur in den Bereichen mit sehr hohen Temperaturen und vor allem sehr hohen rel. Luftfeuchtigkeiten und den damit verbundenen Materialfeuchten einstellt. Da die Materialien nicht beimpft wurden, handelt es sich um die natürlich vorkommende Mikroflora. Die Materialien zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Stärke des Wachstums. Es konnte ein leichter Unterschied in dem Bewuchs zwischen den unbehandelten und den beaufschlagten Proben festgestellt werden. Die Brandschutzsalze wirken leicht fungizid und hemmen das Wachstum der Mycelien. Der Bewuchs ist mit steigenden Brandschutzsalzkonzentrationen rückläufig, wird jedoch bei den verwendeten Konzentrationen nicht vollständig unterdrückt. Die Brandschutzsalze reduzieren also das Pilzwachstum und machen so die durch sie hervorgerufene Auffeuchtung der Materialien wieder wett, die sonst zu einem früheren Pilzwachstum geführt hätten, da die Dämmstoffe schneller Feuchtigkeit aufnehmen würden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Brandschutzsalze nur einen eingeschränkten Einfluss auf die Eigenschaften der Dämmstoffe haben in denen sie verwendet werden. Die untersuchten Verbindungen zeigen auch in ihrem Verhalten untereinander keine großen Unterschiede. Sie sind jedoch absolut notwendig, um den gesetzlich vorgeschriebenen Brandschutz zu gewährleisten. Die Ergebnisse des Teilvorhabens 3b („Brandtechnische

Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene) des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig deuten daraufhin, dass sind die untersuchten Brandschutzmittel gut eignen. Sie sorgen für eine Verbesserung des Entzündungs-, Brand- und Glimmverhaltens. Lediglich das auftretende Nachglimmverhalten des Wasserglases wurde als kritisch bewertet.

Es sollte jedoch darüber nachgedacht werden, ob man für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nur noch solche Brandschutzmittel verwendet die ökologisch unbedenklich sind. Dies würde zu einer weiteren Imageverbesserung dieser Produkte führen. Ausgewählt werden sollten Verbindungen, oder Mischungen von Brandschutzmitteln, die nach der Nutzung der Dämmstoffe keine Probleme bei der Entsorgung (Kompostierung oder Verbrennung) machen. Die Wahl müsste in Abhängigkeit von den Ausgangsmaterialien des jeweiligen Dämmstoffes getroffen werden, da nicht jedes Brandschutzmittel für jeden Dämmstoff geeignet ist.

3.4 Literatur

Becker, R. (1987): Verhütung von Schimmelbildung in Gebäuden; Teil 1: Bauphysikalische Zusammenhänge bei der Tauwasserbildung; Bauphysik 3 (79 - 85)

Bockisch, F.-J. (Hrsg): Beurteilung der raumklimatischen Wirkung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 221, ISBN 3-933140-43-9, (2000)

Dallwitzer, S. G. E. und Biehler, M. J. (1998): Untersuchungen zum Schimmelwachstum und dessen Bekämpfungsmöglichkeiten auf Fugendichtstoffen - Teil 1; Arconis 3 (32 - 35)

DIN EN ISO 12570: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur (ISO 12570:2000) Ausgabe April 2000

DIN EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Ausgabe Mai 2001

DIN 52 620: Bestimmung der Bezugsfeuchtegehalts von Baustoffen; Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23 °C und 80 % relative Luftfeuchte, Ausgabe April 1991

EN 1946-2: Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen - Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften - Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät; Ausgabe April 1999

EN 823: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Dicke; Ausgabe November 1994

Hannenheim von, M. (1998): Adhäsion von Schimmelsporen an Bauteiloberflächen; Arconis 1 (34 - 37)

Murphy, D.P.L., Bockisch, F.-J. und Schäfer-Menuhr, A. (Hrsg): Möglichkeiten und Chancen von heimischen nachwachsenden Rohstoffen zur Nutzung als Dämm-Material, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 203, ISBN 3-933140-25-0, (1999)

Senkpiel, K.; Ohgke, H. und Beckert, J. (1994): Kinetik der Auskeimung von Schimmelpilzsporen auf Baustoffen in Abhängigkeit von deren Gleichgewichts (a_w)-, Material ($\square_m$)- und Oberflächen (φ_0)-Feuchte; Gesundheitsingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 2 (77 - 85)

Schlegel, H. G. (1981): Allgemeine Mikrobiologie; Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York; 5. überarbeitete und erweiterte Auflage

Steinert, J.; Draeger, S. und Paulmann, K. (1981): Eingrenzung der klimatischen Bedingungen für die Entstehung von Wandschimmel in Wohnräumen; Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik - Gesundheits-Ingenieur 2 (57 - 67)

3.5 Tabellen und Abbildungen

Tabelle 53: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachs-Matte K in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,3
55 %	7,6	7,8	8,2	8,6	9,1	9,6
70 %	9,2	9,6	10,2	10,6	11,1	12,0
80 %	11,3	12,0	12,7	13,8	14,6	15,3
90 %	15,2	16,1	16,9	17,6	18,2	19,0
95 %	18,5	20,0	21,2	22,4	24,0	25,1

Tabelle 54: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachs-Matte G in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	5,1	5,3	5,8	6,3	6,6	6,8
55 %	6,5	6,8	7,3	7,7	8,1	8,6
70 %	8,1	8,5	9,0	9,6	10,2	10,6
80 %	10,3	10,8	11,4	12,3	13,4	15,1
90 %	14,8	15,7	16,9	18,1	19,5	21,3
95 %	21,0	22,6	23,5	24,4	25,0	25,6

Tabelle 55: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanf-Matte AF in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,3	7,5	7,7	8,0	8,3	8,5
55 %	8,2	8,5	8,9	9,0	9,2	9,9
70 %	9,2	9,6	10,1	10,6	11,5	12,3
80 %	12,0	12,7	13,6	14,8	16,2	17,7
90 %	17,3	18,2	19,3	21,0	21,9	22,7
95 %	21,6	22,8	23,5	24,1	24,8	25,3

Tabelle 56: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanf-Wolle L in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,5	6,8	7,2	7,7	8,1	8,4
55 %	8,5	8,8	9,4	9,7	10,8	11,5
70 %	11,1	11,6	12,2	12,6	13,3	13,9
80 %	13,1	13,5	14,2	15,3	16,1	17,0
90 %	16,5	17,1	17,9	18,7	19,9	21,3
95 %	21,1	22,6	24,3	25,8	26,4	27,1

Tabelle 57: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulose-Einblasdämmstoff Q in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,2	10,4	10,8	11,2	11,8	12,4
55 %	12,0	12,6	13,1	13,5	13,9	14,2
70 %	13,9	14,2	14,8	15,2	15,9	16,1
80 %	15,6	16,0	16,3	16,9	17,2	17,4
90 %	17,9	18,2	18,9	19,5	19,7	20,3
95 %	19,2	20,0	21,6	22,3	23,0	23,4

Tabelle 58: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulose-Einblasdämmstoff M in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,2	6,4	6,8	7,4	7,9	8,3
55 %	8,6	8,9	9,3	9,9	10,3	10,8
70 %	10,5	10,9	11,5	12,0	12,7	13,6
80 %	13,2	13,8	14,3	15,0	15,8	16,4
90 %	16,3	16,9	17,6	18,8	19,9	20,4
95 %	19,6	20,8	21,6	22,4	23,4	24,1

Tabelle 59: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Seegras-Schüttung X in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	4,9	5,2	5,5	6,0	6,3	6,8
55 %	6,4	6,7	7,2	7,6	8,2	8,7
70 %	8,2	8,8	9,3	10,0	10,6	11,3
80 %	10,1	10,6	11,2	12,0	12,8	13,7
90 %	13,5	14,2	14,9	15,8	16,8	18,1
95 %	17,8	19,2	20,8	21,4	22,0	22,5

Tabelle 60: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzspan-Schüttung B in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,2	8,4	8,8	9,3	9,8	10,2
55 %	10,0	10,3	10,7	11,0	11,5	12,2
70 %	11,9	12,4	13,0	13,7	14,6	15,4
80 %	15,0	15,6	16,2	17,0	17,6	18,4
90 %	18,2	18,7	19,5	20,3	21,1	22,0
95 %	21,9	22,5	23,6	24,5	25,1	25,8

Tabelle 61: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfaser-Platte M in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	4,9	5,2	5,6	6,0	6,3	6,6
55 %	6,2	6,5	6,9	7,4	7,9	8,4
70 %	8,0	8,4	8,9	9,4	10,0	10,6
80 %	10,5	10,9	11,5	12,2	13,1	13,8
90 %	13,4	14,1	15,0	15,6	17,0	18,4
95 %	18,1	19,8	21,0	22,4	24,0	25,1

Tabelle 62: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern ohne Brandschutzmittel in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,4	9,0	9,3	9,9	10,4	10,8
55 %	9,5	10,0	10,4	10,9	11,2	11,5
70 %	12,0	12,7	13,4	14,0	14,8	15,3
80 %	14,6	15,1	15,4	16,1	16,7	17,5
90 %	17,5	18,2	18,9	19,4	20,1	20,9
95 %	19,5	20,8	21,6	22,4	23,1	23,9

Tabelle 63: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 5 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,5	8,9	9,6	10,1	10,5	11,0
55 %	9,7	10,3	10,9	11,1	11,5	11,9
70 %	12,2	12,8	13,6	14,1	15,0	15,6
80 %	15,0	15,6	16,4	16,9	17,4	17,9
90 %	18,2	19,0	19,9	20,4	21,1	21,8
95 %	19,9	21,1	21,9	22,7	23,4	24,0

Tabelle 64: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 10 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,5	9,2	9,6	10,3	10,8	11,3
55 %	10,0	10,8	11,4	11,6	12,2	12,5
70 %	12,8	13,5	14,2	15,0	15,8	16,0
80 %	15,6	16,2	16,9	17,5	18,1	18,6
90 %	19,0	19,8	20,4	21,2	21,8	22,4
95 %	21,5	22,4	22,9	23,6	24,8	25,4

Tabelle 65: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 15 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,0	9,6	10,4	11,0	11,2	11,8
55 %	10,4	11,1	11,9	12,5	13,1	13,6
70 %	14,1	15,0	15,6	16,2	17,0	17,2
80 %	16,2	17,1	17,6	18,2	18,9	19,5
90 %	19,8	20,6	21,4	22,1	22,8	23,6
95 %	22,1	22,8	23,9	24,6	25,9	26,7

Tabelle 66: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 5 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,0	9,3	9,9	10,5	10,8	11,1
55 %	9,8	10,6	11,0	11,5	12,1	12,8
70 %	13,0	13,5	14,1	14,8	15,2	15,7
80 %	15,2	15,6	15,9	16,4	16,9	17,5
90 %	18,5	19,2	19,6	20,0	20,5	20,9
95 %	20,1	21,6	22,4	23,1	23,9	24,8

Tabelle 67: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 10 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,6	10,2	12,5	11,2	11,4	11,9
55 %	10,5	11,1	11,8	12,2	12,6	13,0
70 %	13,2	13,9	14,6	15,3	16,0	16,7
80 %	16,2	16,9	17,5	17,9	18,4	18,8
90 %	19,2	20,1	20,8	21,3	21,8	22,4
95 %	21,0	22,3	23,5	24,7	25,5	26,3

Tabelle 68: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 15 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,3	10,9	11,8	12,6	12,8	13,2
55 %	11,2	11,8	12,3	13,1	13,4	15,1
70 %	15,1	15,6	16,2	16,9	17,4	17,9
80 %	17,0	17,6	18,5	19,1	19,4	20,0
90 %	20,0	20,8	21,5	22,2	23,0	23,6
95 %	21,9	23,0	24,2	25,8	26,9	27,8

Tabelle 69: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 5 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,8	9,2	9,6	10,0	10,3	10,8
55 %	9,6	10,0	10,5	11,1	11,4	11,8
70 %	1	14,0	14,4	14,9	15,4	15,8
80 %	15,0	15,4	16,0	16,3	16,9	17,2
90 %	18,1	18,6	19,2	19,9	20,3	20,8
95 %	19,9	21,2	22,0	22,8	23,6	24,2

Tabelle 70: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 10 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,2	9,8	10,7	11,1	11,3	11,6
55 %	10,1	10,8	11,2	11,7	12,1	12,5
70 %	12,9	13,5	14,0	14,8	15,6	16,2
80 %	15,4	16,0	16,3	17,1	17,4	17,8
90 %	18,8	19,4	20,0	20,4	20,9	21,6
95 %	20,5	21,8	22,6	23,8	24,6	25,5

Tabelle 71: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Flachsfasern mit 15 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,9	10,6	10,9	11,4	11,8	12,3
55 %	10,6	11,2	11,8	12,2	12,6	13,1
70 %	13,5	14,2	14,8	15,6	16,2	17,0
80 %	16,1	16,8	17,2	17,6	18,0	18,4
90 %	19,6	20,1	20,9	21,6	22,3	22,9
95 %	21,9	23,5	24,6	25,2	26,0	26,8

Tabelle 72: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern ohne Brandschutzmittel in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,6	11,2	11,9	12,2	12,8	13,2
55 %	11,5	12,2	12,9	13,2	13,7	14,1
70 %	14,3	15,0	15,7	16,6	17,4	18,3
80 %	17,5	18,2	18,7	19,2	19,9	20,2
90 %	18,9	19,5	19,9	20,4	21,0	21,5
95 %	20,9	22,0	23,2	24,0	24,8	26,1

Tabelle 73: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 5 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,9	11,4	12,0	12,6	13,1	13,4
55 %	11,5	12,1	12,8	13,6	14,2	14,6
70 %	15,0	15,8	16,4	17,0	17,6	18,3
80 %	18,2	18,7	19,1	19,8	20,2	20,5
90 %	19,1	19,8	20,6	21,4	21,9	22,6
95 %	21,6	22,3	23,4	24,1	25,0	26,4

Tabelle 74: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 10 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,3	11,7	12,4	13,0	13,5	13,9
55 %	11,9	12,6	13,2	13,7	14,6	15,5
70 %	16,2	17,0	17,8	18,4	18,9	19,6
80 %	18,5	19,1	19,5	20,3	20,9	21,4
90 %	20,0	20,9	21,4	22,3	23,0	23,4
95 %	22,4	23,6	24,8	25,8	26,4	27,7

Tabelle 75: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 15 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,5	12,0	12,6	13,2	14,0	14,4
55 %	12,5	13,2	13,8	14,6	15,2	15,8
70 %	16,2	17,0	17,9	18,7	19,5	20,3
80 %	19,1	19,4	20,1	20,6	21,3	21,9
90 %	21,5	22,1	22,9	23,4	24,0	24,6
95 %	23,1	24,8	26,1	26,9	27,8	28,7

Tabelle 76: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 5 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,2	11,8	12,3	13,0	13,8	14,2
55 %	13,1	13,8	14,6	14,9	15,2	15,8
70 %	16,0	16,4	16,9	17,5	18,0	18,7
80 %	17,2	17,9	18,6	19,2	19,8	20,3
90 %	19,2	20,1	20,5	21,3	21,8	22,3
95 %	21,0	22,3	23,5	24,1	25,2	26,6

Tabelle 77: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 10 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,3	11,7	12,5	13,1	13,6	14,5
55 %	13,5	13,9	14,7	15,4	15,8	16,3
70 %	16,6	17,3	17,9	18,3	18,7	19,5
80 %	18,1	18,6	19,4	19,9	20,6	21,0
90 %	20,5	21,1	21,9	22,5	23,1	23,4
95 %	22,0	23,3	24,8	25,6	26,1	28,3

Tabelle 78: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 15 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,9	12,5	12,9	13,5	13,9	14,7
55 %	13,9	14,5	15,1	15,8	16,3	16,8
70 %	17,4	17,7	18,5	19,2	19,6	20,1
80 %	19,1	19,4	20,1	20,8	21,2	21,9
90 %	21,3	22,0	22,3	23,4	24,2	24,8
95 %	22,8	24,6	25,7	26,9	28,2	30,1

Tabelle 79: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 5 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,4	11,0	11,5	12,3	12,8	13,0
55 %	13,1	13,6	14,3	14,6	15,2	15,6
70 %	16,1	16,3	17,0	17,3	17,9	18,3
80 %	17,8	18,3	19,0	19,5	19,9	20,3
90 %	19,3	20,1	20,8	21,3	21,9	22,6
95 %	21,4	22,8	24,3	25,1	25,6	26,1

Tabelle 80: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 10 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,6	11,1	11,8	12,6	13,1	13,4
55 %	13,4	14,0	14,2	14,9	15,6	16,0
70 %	16,5	17,1	17,9	18,3	18,6	19,1
80 %	18,4	18,9	19,4	19,9	21,0	21,4
90 %	20,0	21,8	23,1	24,9	25,6	26,1
95 %	22,2	23,9	25,1	26,0	27,1	27,9

Tabelle 81: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Hanffasern mit 15 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,2	12,0	12,2	12,8	13,3	13,8
55 %	13,9	14,4	15,0	15,5	16,1	16,7
70 %	17,0	17,7	18,2	19,0	19,5	20,1
80 %	19,3	19,9	20,2	20,9	21,3	22,0
90 %	21,4	22,8	23,9	25,1	25,5	27,0
95 %	23,1	24,5	26,3	27,1	28,2	29,0

Tabelle 82: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern ohne Brandschutzmittel in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,4	10,6	10,8	11,0	11,2	11,5
55 %	12,0	12,9	13,8	14,2	14,6	15,0
70 %	16,2	16,7	17,4	17,6	18,0	18,5
80 %	17,8	18,2	18,8	19,5	20,6	21,0
90 %	20,0	21,2	22,3	23,8	24,6	25,1
95 %	22,8	25,2	26,8	28,2	29,1	30,2

Tabelle 83 Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 5 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,5	10,8	11,1	11,4	11,8	12,0
55 %	12,2	13,0	13,6	14,0	14,8	15,2
70 %	15,6	16,8	17,5	18,3	18,6	19,0
80 %	18,1	18,6	19,4	19,8	20,9	21,4
90 %	20,4	21,7	22,6	24,0	25,0	25,8
95 %	23,6	25,5	27,0	28,5	29,4	30,5

Tabelle 84: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 10 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,2	11,7	12,0	12,4	13,1	13,2
55 %	12,8	13,2	13,5	14,4	14,9	15,5
70 %	16,2	16,8	17,7	18,6	19,4	20,1
80 %	19,1	19,4	19,9	20,3	20,9	21,8
90 %	20,9	22,4	24,0	24,9	25,5	26,6
95 %	24,3	26,4	28,1	29,3	30,4	31,9

Tabelle 85: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 15 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,9	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0
55 %	13,5	13,9	14,4	15,1	15,9	16,3
70 %	16,6	17,4	18,0	18,8	19,9	20,8
80 %	19,8	20,4	20,6	21,3	21,9	22,5
90 %	21,6	23,8	25,5	26,9	27,6	28,9
95 %	25,6	27,6	29,1	30,4	32,1	33,2

Tabelle 86: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 5 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	10,9	11,2	11,9	12,3	12,7	13,0
55 %	12,5	12,9	13,2	13,9	14,4	14,9
70 %	15,5	16,3	17,1	18,0	18,8	19,6
80 %	18,5	19,0	19,4	20,1	20,9	21,6
90 %	20,6	22,2	23,9	24,6	25,5	26,6
95 %	23,6	25,3	26,8	28,1	29,2	31,0

Tabelle 87 Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 10 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,2	11,7	12,1	12,9	13,6	13,9
55 %	13,1	13,9	14,4	15,1	15,9	16,5
70 %	17,2	17,7	18,3	19,0	19,5	20,1
80 %	19,1	19,6	20,3	21,0	21,5	22,3
90 %	21,4	23,2	25,6	27,1	27,8	28,6
95 %	24,6	26,1	27,5	29,3	30,9	32,3

Tabelle 88: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 15 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,3	12,0	12,5	13,3	14,0	14,4
55 %	13,5	14,2	14,8	15,6	16,1	16,3
70 %	17,0	17,9	18,6	19,3	19,9	20,9
80 %	19,9	20,4	21,1	21,6	22,3	23,1
90 %	22,1	24,2	27,1	28,3	28,9	30,4
95 %	26,0	27,8	29,1	30,6	32,9	33,9

Tabelle 89: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 5 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,2	11,7	12,2	12,6	13,1	13,5
55 %	13,2	13,9	14,3	15,0	15,4	15,9
70 %	16,7	17,2	17,9	18,3	18,9	19,4
80 %	18,7	19,4	19,9	20,4	20,9	21,4
90 %	20,2	21,9	23,6	24,3	25,1	25,9
95 %	22,9	24,6	25,9	27,1	28,4	30,6

Tabelle 90: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 10 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,4	11,8	12,0	12,4	12,9	13,6
55 %	13,4	14,0	14,6	15,0	15,8	16,3
70 %	16,9	17,4	18,0	18,4	19,0	19,6
80 %	19,2	19,5	20,2	20,9	21,5	22,0
90 %	20,6	22,6	24,5	25,2	26,3	27,0
95 %	23,6	25,9	27,2	28,9	30,6	31,7

Tabelle 91: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holzfasern mit 15 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	11,6	12,0	12,6	12,8	13,4	13,8
55 %	13,6	14,5	14,9	15,4	15,9	16,6
70 %	17,2	18,0	18,7	19,2	19,6	20,5
80 %	19,5	20,1	20,8	21,6	22,1	22,8
90 %	21,4	23,2	25,5	27,0	27,5	28,6
95 %	25,0	26,5	28,6	29,9	31,2	33,5

Tabelle 92: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne ohne Brandschutzmittel in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,4	6,8	7,2	7,9	8,1	8,3
55 %	7,9	8,3	8,8	9,2	9,6	10,0
70 %	10,8	11,1	11,3	11,8	12,2	12,6
80 %	12,5	13,1	13,4	13,9	14,5	15,0
90 %	14,8	15,3	15,8	16,5	17,1	17,8
95 %	16,9	17,6	18,4	19,5	20,4	21,6

Tabelle 93: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 5 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,5	6,8	7,3	7,6	8,2	8,6
55 %	8,2	8,6	9,3	9,6	10,2	12,8
70 %	11,5	12,0	12,4	13,0	13,6	13,9
80 %	13,1	13,6	14,3	15,0	15,6	16,2
90 %	15,6	16,2	16,8	17,3	17,6	18,4
95 %	18,0	19,1	19,9	20,8	21,6	22,8

Tabelle 94: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 10 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,0	7,2	7,8	8,1	8,6	9,0
55 %	8,6	9,2	9,6	10,3	10,8	11,5
70 %	12,2	12,9	13,3	14,0	14,5	15,1
80 %	14,0	14,3	15,1	15,8	16,4	17,0
90 %	17,1	17,9	18,4	18,9	19,6	20,5
95 %	19,2	20,8	22,1	23,2	23,8	24,2

Tabelle 95: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 15 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,2	7,6	8,1	8,6	9,2	10,0
55 %	9,0	9,6	10,	10,7	11,4	11,9
70 %	12,6	13,1	13,8	14,6	15,2	15,8
80 %	14,8	15,5	16,0	16,4	17,1	17,6
90 %	17,9	18,5	19,0	19,8	20,4	21,0
95 %	20,1	21,9	23,4	24,8	25,7	26,4

Tabelle 96: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 5 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	6,9	7,2	7,6	8,1	8,3	8,7
55 %	8,3	8,8	9,1	9,6	10,0	10,6
70 %	11,6	12,1	12,6	13,2	13,7	14,0
80 %	13,5	13,9	14,2	14,8	15,5	16,4
90 %	15,9	16,5	17,4	17,9	18,6	19,0
95 %	18,5	19,8	21,0	21,9	22,6	23,6

Tabelle 97: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 10 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,4	7,8	8,4	9,0	9,3	9,7
55 %	8,6	9,0	9,6	10,3	10,6	11,2
70 %	11,9	12,6	13,4	14,1	14,5	14,9
80 %	14,2	14,9	15,4	15,8	16,6	17,4
90 %	17,0	17,6	18,4	19,3	20,0	20,4
95 %	19,9	21,3	22,4	23,3	24,6	25,5

Tabelle 98: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 15 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,9	8,4	9,0	9,3	9,9	10,5
55 %	9,0	9,5	9,9	10,6	11,4	12,0
70 %	12,6	13,4	14,0	14,6	15,3	15,8
80 %	15,0	15,4	16,1	16,8	17,7	18,6
90 %	18,2	18,9	19,4	20,1	21,0	21,7
95 %	21,0	22,4	23,7	25,1	26,2	27,6

Tabelle 99: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 5 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,2	7,5	7,9	8,4	8,8	9,1
55 %	8,1	8,6	9,0	9,5	9,8	10,4
70 %	11,2	11,6	12,1	12,7	13,2	13,8
80 %	13,0	13,4	13,9	14,5	15,1	16,0
90 %	15,1	15,7	16,4	17,2	17,9	18,4
95 %	18,1	19,4	20,6	21,5	22,6	23,3

Tabelle 100: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 10 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	7,6	8,0	8,2	8,5	9,0	9,6
55 %	8,3	8,9	9,3	9,8	10,4	10,9
70 %	11,0	11,6	12,2	12,9	13,6	14,3
80 %	13,6	14,0	14,3	14,9	15,6	16,3
90 %	15,6	16,1	16,8	17,4	18,1	18,7
95 %	18,8	20,0	21,3	22,1	23,5	24,6

Tabelle 101: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Holz-Hobelspäne mit 15 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,0	8,2	8,8	9,2	9,6	10,1
55 %	8,9	9,1	9,6	10,1	10,6	11,2
70 %	11,8	12,5	13,1	13,9	14,7	15,3
80 %	14,5	14,9	15,3	16,0	16,5	17,2
90 %	16,4	16,9	17,5	18,0	18,7	19,5
95%	19,7	20,9	22,0	23,5	24,8	26,1

Tabelle 102: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern ohne Brandschutzmittel in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,6	9,1	9,4	10,0	10,3	10,8
55 %	10,0	10,4	11,0	11,3	11,9	12,4
70 %	12,6	13,2	14,1	14,8	16,0	16,4
80 %	15,6	16,1	16,6	17,3	17,9	18,6
90 %	19,2	19,9	20,5	21,1	21,8	22,8
95 %	22,9	23,2	24,3	25,0	26,4	27,5

Tabelle 103 Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 5 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,8	9,3	9,5	10,0	10,6	11,0
55 %	10,3	10,8	11,2	11,6	12,2	12,6
70 %	13,1	13,8	14,6	15,5	16,3	16,9
80 %	15,9	16,5	17,1	17,6	18,2	18,9
90 %	19,9	20,6	21,3	22,1	23,0	23,7
95 %	23,6	24,5	26,0	27,1	27,8	28,4

Tabelle 104: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 10 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,1	9,6	12,0	12,3	12,8	11,3
55 %	10,6	11,1	11,8	12,4	13,1	13,6
70 %	14,4	15,0	15,6	16,2	16,8	17,4
80 %	16,6	17,1	17,4	18,0	18,7	19,2
90 %	20,6	21,2	21,8	22,7	23,5	24,0
95 %	24,2	25,6	26,9	28,0	28,8	29,7

Tabelle 105: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 15 Gew.- % Borsalz in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,8	10,2	10,5	10,7	11,2	11,6
55 %	11,1	11,6	12,1	12,6	13,2	13,8
70 %	14,3	14,9	15,5	16,2	17,0	18,1
80 %	17,6	18,0	18,6	19,1	19,4	20,0
90 %	21,3	22,0	22,5	23,2	24,0	24,8
95 5	25,1	26,8	27,4	28,9	30,1	31,9

Tabelle 106: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 5 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	8,5	8,9	9,4	9,8	10,4	10,9
55 %	10,0	10,4	10,9	11,4	12,0	12,7
70 %	13,6	14,2	15,1	15,8	16,7	17,6
80 %	16,3	16,9	17,4	18,1	18,6	19,5
90 %	20,3	20,8	21,5	22,3	22,9	23,8
95 %	24,5	25,7	27,2	28,0	28,6	29,2

Tabelle 107: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 10 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,0	9,4	9,6	10,0	10,6	11,3
55 %	10,4	10,8	11,6	12,3	13,0	13,6
70 %	14,4	14,9	15,6	16,2	17,0	18,1
80 %	17,1	17,6	18,3	19,0	19,8	20,4
90 %	21,0	21,6	22,4	23,2	23,9	24,9
95 %	26,1	27,4	28,2	29,1	29,9	30,6

Tabelle 108: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 15 Gew.- % Ammoniumphosphat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,6	10,1	10,5	11,2	12,0	12,6
55 %	11,0	11,6	12,3	12,9	13,7	14,6
70 %	15,2	15,8	16,6	17,5	18,2	19,1
80 %	18,2	18,7	19,5	20,2	21,0	21,6
90 %	22,3	23,0	23,5	23,3	25,1	25,8
95 %	27,3	28,5	29,8	31,0	31,8	32,4

Tabelle 109: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 5 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,0	9,3	9,9	10,3	10,7	11,2
55 %	9,9	10,2	10,7	11,1	11,6	12,2
70 %	13,8	14,6	15,2	15,8	16,6	17,3
80 %	16,5	17,0	17,6	18,2	18,8	19,3
90 %	20,5	21,1	21,6	22,3	22,6	23,2
95 %	24,1	25,2	26,5	27,3	28,2	28,8

Tabelle 110: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 10 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,5	9,8	10,3	10,6	11,1	11,7
55 %	10,1	10,6	10,9	11,5	12,0	12,8
70 %	14,2	14,9	15,7	16,6	17,4	18,2
80 %	17,6	18,2	18,6	19,3	19,9	20,5
90 %	21,3	22,0	22,6	23,3	24,1	24,9
95 %	25,0	26,3	27,6	28,0	29,1	30,0

Tabelle 111: Feuchtigkeitsaufnahme (in Gew.- %) von Cellulosefasern mit 15 Gew.- % Natriumsilikat in Abhängigkeit von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit

Temperatur rel. Luftfeuchte	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
40 %	9,9	10,3	10,6	11,1	11,8	12,2
55 %	10,8	11,3	12,0	12,5	13,2	13,6
70 %	15,1	15,8	16,4	17,2	18,0	18,9
80 %	19,1	19,4	20,0	20,5	21,1	21,8
90 %	22,3	23,0	23,6	24,1	25,0	25,8
95 %	26,2	27,5	28,6	29,8	30,7	31,8

4 Teilvorhaben 3b: Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene

4.1 Einleitung

4.1.1 Ausgangssituation

Der Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist aufgrund bauaufsichtlicher Vorschriften nur eingeschränkt möglich. Einer verbreiteten Anwendung stehen je nach Gebäudeklasse und Bauweise mehr oder weniger hohe brandschutztechnische Anforderungen entgegen. Vorbehalte gegenüber brennbaren Dämmstoffen bestehen von Seiten der Bauaufsicht und der Feuerwehr vor allem wegen des Risikos der Brandausbreitung im Inneren der Konstruktionen, der Erhöhung der Brandlasten und insbesondere der Vergrößerung des Rauchgaspotenzials, da der weitaus größte Anteil (ca. 80 %) der Brandtoten infolge von Rauch ums Leben kommt.

Hinzu kommt, dass die neue europäische Baustoffklassifizierung mit einer Vielzahl von Unterklassen und Anforderungskriterien die Planer mehr denn je verwirrt. So greifen sie schon von vornherein zu nichtbrennbaren Dämmstoffen, um das Baugenehmigungsverfahren aus ihrer Sicht nicht zu verkomplizieren. Es bleibt unberücksichtigt, dass brennbare Dämmstoffe aus Sicht der Bauordnung vielleicht sogar möglich gewesen wären. Hier besteht dringender Aufklärungs- und Überprüfungsbedarf.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen sind Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, aufgrund ihres organischen Charakters, nach DIN 4102 “normalentflammbar” (B2) oder sogar “leichtentflammbar (B3), bzw. nach DIN EN 13501-1 der Klasse E oder sogar der Klasse F zuzuordnen. Um die Klassifizierung B2 oder gar B1 („schwerentflammbar“) zu erreichen, müssen Zusätze aus Flammschutzmitteln beigefügt werden. Es handelt sich in der Regel um Borate – Borsalze, die im Brandgeschehen Kristallwasser abspalten. Zum Teil muss hier mit erheblichen Mengen dieser Mitteln gearbeitet werden (ca. 20 % bei Cellulosedämmstoffen und der Anforderung B1), um die erforderlichen Baustoffprüfungen zu bestehen. Eine Beimischung großer Mengen an Flammschutzmitteln steht dem ökologischen Grundgedanken eines möglichst naturbelassenen und unbehandelten Dämmstoffs jedoch entgegen, so dass hier dringender Forschungsbedarf besteht.

Nicht von der Hand zu weisen ist der Vorbehalt gegenüber brennbaren Baustoffen, die sich im Inneren einer Konstruktionen befinden, dass sich ein Brand, der in diese Konstruktion eindringt ungehindert ausbreiten kann. Daher sind im mehrgeschossigen Holztafelbau brennbare Dämmstoffe nach der Musterholzbaurichtlinie (M-HFHHolzR) [22] ausgeschlossen. Der Grund dafür ist, dass bisher noch nicht durch entsprechende Versuche nachgewiesen wurde, dass durch gezielte konstruktive Maßnahmen eine Brandentstehung innerhalb der Konstruktion und eine Brand- und Rauch-

ausbreitung in benachbarte Nutzeinheiten beim Vorhandensein von brennbaren Dämmstoffen wirksam behindert werden kann.

4.1.2 Zielsetzung

Durch Literaturrecherchen sowie durch praktische Untersuchungen sollen Informationen gewonnen werden, die die bauaufsichtlichen Anforderungen auflisten und den möglichen Einsatzbereich von brennbaren Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen aufzeigt. Weiter soll der derzeitige Stand der europäischen Zulassungen verständlicher dargestellt werden, so dass den Herstellern und Anwendern eine Hilfestellung in der Übergangsphase gegeben werden kann.

Es werden exakte Analysen zum Brandverhalten von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im Labormaßstab mittels eines Cone-Kalorimeters durchgeführt, um Grundlagen für eine objektive Bewertung und Festlegung von Anwendungsgebieten in Abhängigkeit der Baustoffklassifizierung nach Euro-Klassen zu schaffen. Weiterhin wird untersucht, inwieweit der Flammschutzmittelanteil reduziert werden kann, bzw. ökologisch bedenkliche Flammschutzmittel durch ökologisch unbedenkliche Produkte ersetzt werden können, ohne dass sich das Brandverhalten signifikant verschlechtert. Als Ergebnis soll eine Vorgehensweise als Richtschnur aufgestellt werden, die den Herstellern die künftige Entwicklung und Herstellung ihrer Produkte erleichtert.

Hinsichtlich der Erweiterung des Anwendungsbereiches brennbarer Dämmstoffe auf den mehrgeschossigen Holztafelbau soll innerhalb dieses Vorhabens durch Brandversuche an praxisgerecht hergestellten Holzständerbauteilausschnitten mit brennbaren Dämmstoffen der Nachweis erbracht werden, dass durch entsprechende Kapselung der Konstruktion eine Erhöhung des Rauchgaspotenzials und eine Brandentstehung innerhalb der Konstruktion praktisch ausgeschlossen werden kann. Die dabei gewählte experimentelle Vorgehensweise soll als Grundlage für ein neues Prüfverfahren dienen und die Ergebnisse der nationalen Normungstätigkeit zufließen.

4.2 Zusammenstellung aktueller Einsatzmöglichkeiten brennbarer Dämmstoffe

In diesem Kapitel werden die brandschutztechnischen Anforderungen an Baustoffe und Bauteile zusammengetragen. Die Daten werden anschließend dahingehend analysiert, ob eine Anwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen grundsätzlich möglich ist. Es ist dabei zu beachten, dass Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen auf Grund ihres organischen Charakters die Anforderung nichtbrennbar auch durch Zugabe von Flammschutzmitteln nicht erfüllen können. Eine ausführliche Darstellung der Einsatzmöglichkeiten liefert die Studienarbeit „Anwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter Berücksichtigung der europäischen Baustoffklassifizierung“ [23].

4.2.1 Musterbauordnung

Die grundlegenden Anforderungen an den Brandschutz sind in den Landesbauordnungen geregelt. Stellvertretend wird hier auf die Musterbauordnung (MBO) von 2002 [24] Bezug genommen. Sie stellt eine Leitfunktion

für die einzelnen Landesbauordnungen dar. In § 3 der MBO werden zunächst die allgemeinen Anforderungen beschrieben:

§ 3: (1) Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern, und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.

Es wird eindeutig festgelegt, dass die öffentliche Sicherheit eines Gebäudes zu jedem Zeitpunkt der Nutzung gewährleistet sein muss. Dies gilt sowohl für einen Neubau als auch für Umbaumaßnahmen an einem bestehenden Gebäude.

In § 14 der MBO werden die Anforderungen an den Brandschutz konkretisiert.

§ 14: Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

§ 14 gibt an, welche Forderungen eingehalten werden müssen, damit ein Bauwerk „brandsicher“ ist, ohne auf Detailanforderungen hinsichtlich Baustoffe, Bauteile und Rettungswege näher einzugehen. Dies sind im Einzelnen:

- Der Entstehung eines Brandes ist vorzubeugen.
- Der Ausbreitung von Feuer und Rauch ist vorzubeugen.
- Die Rettung der Menschen muss möglich sein.
- Wirksame Löscharbeiten müssen möglich sein.

Diese Anforderungen werden bezogen auf die Gebäudenutzung und Gebäudehöhe in den §§ 26 - 41 der MBO konkretisiert. Dazu werden Mindestanforderungen hinsichtlich der Baustoffwahl, der Bauteilauslegung sowie der Dimensionierung von Brandabschnitten und Rettungswegen festgelegt. In Abhängigkeit vom definierten Risiko erhöhen sich die Anforderungen hinsichtlich der Nichtbrennbarkeit von Baustoffen, sowie der Tragfähigkeit und der raumabschließenden Wirkung von Bauteilen.

Die in den Bauordnungen gestellten Anforderungen beziehen sich generell auf Gebäude normaler Art und Nutzung. Hierzu zählen unter anderem Wohn- und Bürogebäude. Bei „baulichen Anlagen besonderer Art oder Nutzung“ verweist die MBO in den §§ 2 und 50 darauf, dass zur Erfüllung der allgemeinen Anforderungen gemäß § 3 besondere Anforderungen gestellt oder Erleichterungen gestattet werden können. Verankert sind diese Abweichungen in Verordnungen oder Richtlinien für Sonderbauten. Im einzelnen sind dies

die M-HFHHolzR (Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise, Fassung Juli 2004),

die M-IndBauRL (Muster-Industriebaurichtlinie, Fassung März 2005),

die MBeVO (Muster-Beherbergungsstättenverordnung, Fassung Dezember 2000),

die MGarVO (Muster Garagenverordnung, Fassung September 1997),

die MVkVO (Muster-Verkaufsstättenverordnung, Fassung September 1995),

die VStättVO (Muster-Versammlungsstättenverordnung, Fassung Juni 2005),

die MSchulbauR (Muster-Schulbau-Richtlinie, Fassung Juli 1998) und

die MHochhausRL (Muster-Hochhausrichtlinie, Fassung Mai 1981).

Grundlage des Standard-Brandschutzkonzepts der MBO ist die Einteilung der Gebäude in 5 Gebäudeklassen in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe und der Größe der Nutzungseinheiten. Als Höhe gilt in diesem Zusammenhang die Fußbodenoberkante des höchsten Aufenthaltsraumes. Tabelle 112 zeigt die Einteilung der Gebäude nach § 2 der MBO. Je nach Gebäudeklasse werden Anforderungen hinsichtlich der Baustoffe, der Bauteile, der Brandabschnitte und der Rettungswege gestellt.

Gebäudeklasse 1:
freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m² und freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude,

Gebäudeklasse 2:
Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m²,

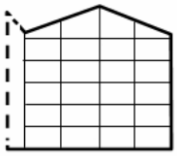
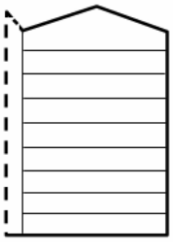
Gebäudeklasse 3:
sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m,

Gebäudeklasse 4:
Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m²,

Gebäudeklasse 5:
sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude mit einer Höhe größer 13 m bis zu maximal 22 m.

Als Gebäudehöhe ist die Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, definiert. Die Grundflächen der Nutzungseinheiten im Sinne dieses Gesetzes sind die Brutto-Grundflächen; bei der Berechnung der Brutto-Grundflächen bleiben Flächen in Kellergeschossen außer Betracht.

Tabelle 112: Einteilung der Gebäude nach der MBO

GK 1a	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
freistehende Gebäude OKF ≤ 7 m ≤ 2 Nutzungseinh. ∑ NE ≤ 400 m²	nicht freistehende Gebäude OKF ≤ 7 m ≤ 2 Nutzungseinh. ∑ NE ≤ 400 m²	sonstige Gebäude mit einer OKF ≤ 7 m	OKF ≤ 13 m Nutzungseinh. mit jeweils ≤ 400 m² 	sonstige Gebäude mit Ausnahme von Sonderbauten OKF ≤ 22 m 
GK 1b freistehende Gebäude land- und forstwirtschaftl. genutzt				
Feuerwehreinsatz mit Steckleiter möglich			Feuerwehreinsatz mit Drehleiter erforderlich	

Die Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe und Bauteile werden zunächst in § 26 allgemein wiedergegeben. In den weiteren §§ des vierten Abschnitts der MBO werden die in § 26 genannten Anforderungen in Abhängigkeit der Gebäudeklasse den verschiedenen Bauteilen zugeordnet. Dies sind:

§ 27: Tragende Wände, Stützen

§ 28: Außenwände

§ 29: Trennwände

§ 30: Brandwände

§ 31: Decken

Nach § 26 werden die Baustoffe grundsätzlich in nichtbrennbare (A) und brennbare (B) Baustoffe unterschieden. Die brennbaren Baustoffe werden weiter in normalentflammbare Baustoffe (B2) und schwerentflammbare Baustoffe (B1) unterteilt. Eine genaue Beschreibung der Anforderungen und der Prüfungen ist in Kapitel 4.3.3 enthalten. Die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen des § 26 der MBO sind in Tabelle 113 zusammengefasst. Bei den Bauteilanforderungen wird zwischen feuerbeständigen, hochfeuerhemmenden und feuerhemmenden Bauteilen unterschieden.

Tabelle 113: Zuordnung der bauaufsichtlichen Bennennungen

Bauaufsichtliche Benennung	Mindestanforderung		Kurzbezeichnung
	Feuerwiderstandsdauer	Baustoffanforderungen	
feuerbeständig	90 Minuten	Tragende und aussteifende Teile nichtbrennbar; bei Raumabschluss durchgehende nichtbrennbare Schicht	F 90- AB
hochfeuerhemmend	60 Minuten	Tragende und aussteifende Teile nichtbrennbar; bei Raumabschluss durchgehende nichtbrennbare Schicht	F 60- AB
		Tragende und aussteifende Teile brennbar; brandschutztechnisch wirksame Bekleidung; Nichtbrennbare Dämmstoffe	REI60 $K_2$60
feuerhemmend	30 Minuten	brennbar	F 30- B

Tabelle 113 zeigt, dass der Einsatz brennbarer Dämmstoffe nur bei hochfeuerhemmenden Bauteilen in Holzbauweise nicht zulässig ist (grau hinterlegt). Hochfeuerhemmende Bauteile mit einer tragenden Struktur aus nichtbrennbaren Baustoffen dürfen wie feuerbeständige Bauteile brennbare Dämmstoffe enthalten. Dies bedeutet, dass z. B. in einer hochfeuerhemmenden Holzständerwand der Einsatz brennbarer Dämmstoffe verboten ist. Würden nun die brennbaren Holzständer durch nichtbrennbare Metallständer ersetzt, dürften brennbare Dämmstoffe als Hohlraumdämmung eingesetzt werden. Dies sogar auch bei der Bauteilanforderung feuerbeständig. Diese Unterscheidung ist historisch gewachsen und kaum begründbar. Kapitel 4.12 zeigt unter welchen konstruktiven Randbedingungen brennbare Dämmstoffe ebenfalls in hochfeuerhemmenden Holztafelelementen eingesetzt werden können, ohne dass das allgemein akzeptierte brandschutztechnische Sicherheitsniveau verlassen wird. Die Anforderungen der §§ 27 bis 31 der MBO sind in Tabelle 114 dargestellt.

Tabelle 114: Zusammenfassung der Anforderungen an Bauteile nach MBO

Gebäudeklasse		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Bauteil/ Gebäude		Gebäudehöhe < 7 m freist. < 2 WE < 400 m²	< 2 WE < 400 m²		Höhe < 13 m, NE < 400 m²	Sonst. Gebäude einschließlich unterirdische Gebäude
Tragende oder aussteifende Wände	Dachraum [3]	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -
	Geschoss	- / -	F 30- B	F 30- B	F 60- AB REI60 $K_2$60	F 90- AB
	Keller	F 30- B	F 30- B	F 90- AB	F 90- AB	F 90- AB
Trennwände	Dachraum [3]	F 30- B	F 30- B	F 30- B	F 30- B	F 30- B
	Geschoss	F 30- B	F 30- B	F 30- B	F 60- BA REI60 $K_2$60	F 90- AB
	Keller	F 30- B	F 30- B	F 90- AB	F 90- AB	F 90- AB
Nichttragende Außenwände		- / -	- / -	- / -	A oder F 30- B	A oder F 30- B
Außenwand-Bekleidungen		- / -	- / -	- / -	B1 oder B2 [1]	B1 oder B2 [1]
Gebäudeabschlusswände (Abstand < 5 m)		F 60- AB REI60 $K_2$60	F 60- AB REI60 $K_2$60	F 60- AB REI60 $K_2$60	F 60- AB [2] REI60 $K_2$60	BW
Decken	Dachraum [3]	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -
	Geschoss	- / -	F 30- B	F 30- B	F 60- AB REI60 $K_2$60	F 90- AB
	Keller	F 30- B	F 30- B	F 90- AB	F 90- AB	F 90- AB
Dächer		Harte Bed. Oder Abstand	Harte Bed. Oder Abstand	Harte Bed. Oder Abstand	Harte Bedachung	Harte Bedachung
Gebäudetrennwände (40m Gebäudeabschnitte)		F 60- BA REI60 $K_2$60	F 60- BA REI60 $K_2$60	F 60- BA REI60 $K_2$60	F 60- BA REI60 $K_2$60	BW
Treppenraum	Dach	- / - [4]	- / - [4]	- / -	- / -	- / -
	Decke	- / - [4]	- / - [4]	F 30- B	F 60- AB REI60 $K_2$60	F 90- AB
	Wände	- / - [4]	- / - [4]	F 30- B	F 60- AB [2] REI60 $K_2$60	BW
allg. zugängl. Flure als Rettungsweg	Wände	- / - [4]	- / - [4]	F 30- B od. F 90- AB [5]	F 30- B od. F 90- AB [5]	F 30- B od. F 90- AB [5]

[1] wenn geeignete Maßnahmen gegen eine Brandausbreitung getroffen werden
[2] unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung
[3] kein Aufenthaltsraum oberhalb
[4] nicht erforderlich
[5] in Kellergeschossen, deren tragenden Wände F 90- AB sein müssen

Zu Tabelle 114 ist anzumerken, dass Wärmedämmverbundsysteme ebenfalls zu Außenwand-Bekleidungen zählen. Die Anforderung, dass ab einer Gebäudehöhe größer 7 m nur schwerentflammbare Dämmstoffe eingesetzt werden dürfen betrifft somit ebenfalls Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

4.2.2 M-HFHHolzR: Muster-Holzbaurichtlinie

Durch Einführung der Feuerwiderstandsklasse hochfeuerhemmend der Gebäudeklasse 4 in die Muster-Bauordnung 2002 besteht die Möglichkeit Gebäude bis zu 13 m Höhe (5 Vollgeschosse) in ihrer tragenden Struktur aus Holz zu errichten. Dies war zuvor nur bis 7 m Gebäudehöhe zulässig. Als Voraussetzung wird in § 26 Abs. 2 der MBO gefordert, dass hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aufweisen müssen. Der Begriff der „brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung“ wird in der MBO nicht näher definiert. Dies geschieht in der „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise“ (M-HFHHolzR), kurz „MusterHolzbauRichtlinie“ [22]. Sie gilt für Gebäude der Gebäudeklasse 4, deren tragende und aussteifende Teile aus Holz oder Holzwerkstoffen bestehen. Die bauaufsichtlichen Vorschriften fordern eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung. Die Dämmstoffe zwischen den Holzständern müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. In der Richtlinie werden eine Reihe konstruktiver Mindestanforderungen aufgestellt. Dadurch soll insbesondere ein Brennen der tragenden und aussteifenden Holzkonstruktionen ausgeschlossen werden. Weiterhin soll die Einleitung von Feuer und Rauch in die Bauteile sicher verhindert und eine Weiterleitung von Feuer und Rauch über Anschlussfugen von raumabschließenden Bauteilen in angrenzende Nutzungseinheiten oder Räume ausgeschlossen werden.

Die Brandschutzbekleidung muss allseitig und durchgängig aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Sie hat die Aufgabe, die Holzbauteile während eines Zeitraums von 60 Minuten vor der Entzündung zu schützen.

Die Richtlinie gilt für Holzbauweisen, die einen gewissen Grad der Vorfertigung aufweisen wie der Holztafelbau, Holzrahmenbau und der Fachwerkbau. Sie gilt nicht für Holz-Massivbauweisen wie die Brettstapel- und Blockbauweise, ausgenommen Brettstapeldecken.

Die Dämmstoffe die nach dieser Richtlinie für hochfeuerhemmende Bauteilen in Holzbauweise verwendet werden dürfen, müssen nichtbrennbar sein und einen Schmelzpunkt von mehr als 1000°C besitzen. Der Anwendungsbereich von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen beschränkt sich somit in Verbindung mit der Holzbauweise auf die Gebäudeklassen 1 bis 3.

4.2.3 M-IndBauRL: Muster-Industriebaurichtlinie (2000)

Die M-IndBauRL [25] gilt für Gebäude und Gebäudeteile im Bereich der Industrie und des Gewerbes, die der Produktion (Herstellung, Behandlung, Verwertung, Verteilung) oder Lagerung von Produkten oder Gütern dienen.

Zur Bestimmung der brandschutztechnischen Anforderungen stehen zwei Verfahren zur Auswahl. Dies sind das Verfahren ohne Brandlastermittlung

nach Abschnitt 6 der M-IndBauRL und das Verfahren nach Kapitel 7 mit Brandlastermittlung unter Verwendung des Rechenverfahrens nach DIN 18230-1 [26].

Die Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sowie an die Größe der Brandabschnitte im Verfahren ohne Brandlastermittlung ergeben sich in Abhängigkeit der Brandabschnittsgröße, der Anzahl der Geschosse und der Sicherheitskategorie. Die Anforderungen an die aussteifenden und tragenden Bauteile für Industriegebäude sind in Tabelle 115 wiedergegeben. Bei den grau hinterlegten Feldern ist der Einsatz brennbarer Dämmstoffe nicht erlaubt.

Tabelle 115: zulässige Größen der Brandabschnittsflächen in m² [25]

Sicherheitskategorie	Anzahl der Geschosse des Gebäudes								
	erdgeschossig		2geschossig			3geschossig		4geschossig	5geschossig
	Feuerwiderstandsdauer der tragenden und aussteifenden Bauteile								
	Ohne Anforde-rungen	F30-B	F30-B	F60-A	F90-A	F60-A	F90-A	F90-A	F90-A
K1	1800[1)]	3000	800[2)3)]	1600[2)]	2400	1200[2)3)]	1800	1500	1200
K2	2700[1)]	4500	1200[2)3)]	2400[2)]	3600	1800[2)]	2700	2300	1800
K3.1	3200[1)]	5400	1400[2)3)]	2900[2)]	4300	2100[2)]	3200	2700	2200
K3.2	3600[1)]	6000	1600[2)]	3200[2)]	4800	2400[2)]	3600	3000	2400
K3.3	4200[1)]	7000	1800[2)]	3600[2)]	5500	2800[2)]	4100	3500	2800
K3.4	4500[1)]	7500	2000[2)]	4000[2)]	6000	3000[2)]	4500	3800	3000
K4	10000	10000	8500	8500	8500	6500	6500	5000	4000

[1)] Breite des Industriebaus $\leq$ 40m und Wärmeabzugsfläche (nach DIN 18230-1) $\geq$ 5%

[2)] Wärmeabzugsfläche (nach DIN 18230-1) $\geq$ 5%

[3)] Für Gebäude geringer Höhe ergibt sich nach §25 Abs.1 i.V. m. §28 Abs.1Nr.2MBO eine zulässige Größe von 1600m²

Bei erdgeschossigen Industriebauten existieren somit beim Verfahren ohne Brandlastermittlung keine Einschränkungen für den Einsatz brennbarer Dämmstoffe in tragenden Bauteilen. Für Bauteile mit einer geforderten Feuerwiderstandsdauer ≥ 60 Minuten (> 2 Geschosse) dürfen keine brennbaren Dämmstoffe verwendet werden.

Zu ergänzen ist, dass Deckenbekleidungen einschließlich ihrer Dämmstoffe ebenfalls nicht aus brennbaren Baustoffen bestehen dürfen.

Bei dem zweiten Verfahren wird auf Grundlage der Brandlasten mittels dem Rechenverfahren nach DIN 18230-1 die äquivalente Branddauer $t_{ä}$ ermittelt. Hiermit wird die maximal zulässige Größe des Brandbekämpfungsabschnitts und die Anforderungen an die Bauteile ermittelt. Entsprechend ihrer brandschutztechnischen Bedeutung werden die verschiedenen Bauteile sogenannten Brandsicherheitsklassen zugeordnet.

Die Anforderungen an Baustoffe und Bauteile im Verfahren mit Brandlastermittlung sind in Abhängigkeit der Brandsicherheitskategorien Tabelle 116 zu entnehmen.

Tabelle 116: Bauteilanforderungen beim Verfahren mit Brandlastermittlung

	Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102 von Bauteilen, die		
Rechn. erf. Feuerwiderstandsdauer erf t_f in Minuten	Brandbekämpfungsabschnitte trennen	SK_b3 zuzuordnen sind	SK_b2 und SK_b1 zuzuordnen sind
≤ 15	F 30- A	- / -	- / -
>15 bis ≤ 30	F 30- A	F 30- AB*	F 30- B
> 30 bis ≤ 60	F 60- A	F 60- AB*	F 60- B
> 60	F 90- A	F 90- AB	F 90- B

*) mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung

Beim Verfahren mit Brandlastermittlung dürfen somit nur für Bauteile, die Brandbekämpfungsabschnitte trennen und F 90-Bauteile der Sicherheitskategorie SK_b3 keine brennbaren Dämmstoffe verwendet werden. Für den Fall, dass brennbare Dämmstoffe verwendet werden, müssen diese ebenfalls bei der Erhebung der Brandlasten berücksichtigt werden, sofern sie thermisch umgesetzt werden.

Bei beiden Verfahren werden an nichttragende Bauteile im Allgemeinen keine Anforderungen gestellt. Eine Ausnahme bilden nichttragende Außenwände. Bei Brandabschnittsflächen > 2000 m² müssen nichttragende Außenwände, somit auch die Dämmstoffe, mindestens den Anforderungen der Baustoffklasse B1 genügen. Bei mehrgeschossigen Industriegebäuden ohne selbsttätige Löschanlage sind nur nichtbrennbare Dämmstoffe zulässig.

4.2.4 MBeVO: Muster-Beherbergungsstättenverordnung (2000)

Die Muster- Verordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten [27] gilt für Beherbergungsstätten mit mehr als 12 Gastbetten. Es handelt sich hierbei um Gebäude, die ganz oder teilweise für die Beherbergung von Gästen bestimmt sind. Hiervon nicht betroffen sind Ferienwohnungen.

Die brandschutztechnischen Anforderungen an die Bauteile und die Baustoffe sind den §§ 4 und 5 zu entnehmen. Die Anforderungen sind in Tabelle 117 zusammengefasst.

Tabelle 117: Anforderungen an Wandbauteile nach MBeVO

Bauteile	Oberster Dachraum ohne Beherbergung	Gebäude der Gebäudeklassen 1 u. 2	Oberster Dachraum mit Beherbergung	Alle übrigen Gebäude u. Gebäudeteile
tragende Wände	- / -	F 30- B	F 30- B	F 90- AB
Trennwände zwischen Räumen der Beherbergungsstätte und Räumen die nicht zur Beherbergungsstätte gehören	- / -	F 30- B	F 30- B	F 90- AB
Trennwände zwischen Beherbergungsräumen und Gasträumen / Küche	- / -	F 30- B	F 30- B	F 90- AB
Trennwand zwischen Beherbergungsräumen sowie zwischen Beherbergungsräumen und sonstigen Räumen	- / -	F 30- B	F 30- B	F 30- AB

Der Einsatz von brennbaren Dämmstoffen ist nach der MBeVO nicht zusätzlich beschränkt. Tabelle 117 verdeutlich, dass der Einbau von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in allen Gebäuden und Gebäudeteilen möglich ist, sofern die Bauteilanforderungen der jeweiligen Landesbauordnung hinsichtlich Feuerwiderstandsdauer und Baustoffwahl erfüllt sind.

4.2.5 MGarVO: Muster-Garagenverordnung (1997)

Das vorliegende Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen [28] stammt aus dem Jahre 1993 und wurde durch Beschlüsse in den Jahren 1996 und 1997 geändert. In der Verordnung wird zwischen Klein-, Mittel- und Großgaragen unterschieden. Eine Kleingarage hat eine maximale Nutzfläche von 100 m², eine Mittelgarage zwischen 100 m² und 1000 m² und eine Großgarage hat eine Nutzfläche großer 1000 m².

Die brandschutztechnischen Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sind in den §§ 6 bis 9 enthalten und werden zusammengefasst in Tabelle 118 dargestellt.

Tabelle 118: Anforderungen an Bauteile nach der MGarVO

Bauteile	Feuerwiderstands-klasse
Tragende Wände und Decken von	
Garagen mit einer Höhe > 22 m	F 90- AB
mehrgeschossigen Mittel- und Großgaragen < 22 m	F 30- A
mehrgeschossigen, offenen Mittel- und Großgaragen < 22 m	A
eingeschossigen oberirdischen Mittel- und Großgaragen, die allein der Garagennutzung dienen (auch mit Dacheinstellplätzen)	F 30- B
	A
bei Kleingaragen, soweit sich aus den §§25 und 26 (MBO 1996) keine weitergehenden Anforderungen ergeben	F 30-B
	A
Automatischen Garagen	A
Kleingaragen, die allein der Garagennutzung dienen	- / -
offene Kleingaragen	- / -
Kleingaragen, die in Gebäuden liegen ohne brandschutztechnische Anforderungen an die tragenden oder aussteifenden Bauteile	- / -
Außenwände von	
Mittel- und Großgaragen	A
eingeschossigen, oberirdischen Mittel- und Großgaragen, die allein der Garagennutzung dienen	- / -
Kleingaragen kleiner 20m² Grundfläche, soweit sich aus §26 (MBO 1996) keine weitergehenden Anforderungen ergeben	- / -
Trennwände	
im Innern von Mittel- und Großgaragen	A
zwischen Mittel- und Großgaragen und Mittel- und Großgaragen und anderen Gebäuden	F 90-AB
zwischen Kleingaragen und Kleingaragen und anderen Gebäuden	F 30-B
zwischen Kleingaragen und Räumen oder Gebäuden, die nur Abstellzwecken dienen und nicht mehr als 20m² Grundfläche haben	- / -
zwischen offenen Kleingaragen und anders genutzten Räumen oder Gebäuden	- / -
Brandwände	
in Garagen	F90- A und Stoßbel.
eingeschossiger oberirdischer Mittel- und Großgaragen, die allein der Garagennutzung dienen	F 90- AB (ohne Öffnungen)
geschlossener Kleingaragen mit nicht mehr als 20m² Grundfläche	F 30- B
	A

Wie in Tabelle 118 zu erkennen ist, sind brennbare Dämmstoffe auch in Garagenbauten einsetzbar. Die wesentlichen Ausnahmen, in denen keine brennbaren Dämmstoffe eingesetzt werden dürfen (grau hinterlegt), bilden Außenwände und innere Trennwände von Mittel- und Großgaragen.

4.2.6 MVkVO: Muster-Verkaufsstättenverordnung (1995)

Verkaufsstätten im Sinne dieser Verordnung sind Gebäude oder Gebäudeteile, die dem Verkauf von Waren dienen. Messebauten sind keine Verkaufsstätten. Die Muster-Verkaufsstättenverordnung [29] gilt für Verkaufs-

stätten, deren Verkaufsräume eine Fläche von mindestens 2000 m² aufweisen.

Die brandschutztechnischen Anforderungen an die Bauteile sind in den §§ 3 bis 5 und den §§ 7 bis 9 geregelt und auszugsweise in Tabelle 119 wiedergegeben.

Tabelle 119: Anforderungen an Wandbauteile nach MVkVO

Bauteile	erdgeschossig, mit Sprinkler	erdgeschossig, ohne Sprinkler	mehrgeschossig mit Sprinkler	mehrgeschossig ohne Sprinkler
tragende Wände	- / -	F 30-B	F 90-AB	F 90-AB
Außenwände	F 30- B	F 30- B	F 90- AB	F 90- AB
	B1	B1	B1	A
Trennwände	F 90- AB	F 90- AB	F 90- AB	F 90- AB
Decken	A	F 30- A	F 90- A	F 90- A
Dächer	A	F 30- B	A	F 90- AB
Außenwand-verkleidungen	B1	B1	B1	A
Decken-verkleidungen	A	A	A	A
Wandverklei-dungen*	A	A	A	A

*) in Treppenräumen, notwendigen Fluren und Ladenstraßen

Auch in Verkaufsstätten ist der Einsatz brennbarer Dämmstoffe möglich. Einschränkungen bestehen bei Decken, bei denen ausnahmslos nur nichtbrennbare Baustoffe verwendet werden dürfen.

4.2.7 MVStättV: Muster-Versammlungsstättenverordnung

Diese Verordnung [30] tritt bei Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen in Kraft, bei denen über einen Rettungsweg mehr als 200 Personen die Flucht ermöglicht werden muss. Auch bei Sportstadien mit einem Fassungsvermögen von mehr als 5000 Besuchern und bei Versammlungsstätten im Freien, die ganz oder teilweise aus baulichen Anlagen bestehen und mehr als 1000 Besuchern Platz bieten, gilt diese Verordnung.

Die brandschutztechnischen Anforderungen an Bauteile und Dächer sind in den §§ 3 und 4 geregelt. In § 5 wird die Verwendung von Dämmstoffen reglementiert, der in Absatz 1 die Verwendung brennbarer Dämmstoffe ausschließt.

§5: Dämmstoffe, Unterdecken, Bekleidungen und Bodenbeläge

(1) Dämmstoffe müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Somit ist der Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Versammlungsstätten nach dieser Richtlinie nicht erlaubt.

4.2.8 MSchulbauR: Muster-Schulbaurichtlinie (1998)

Die Muster-Schulbaurichtlinie [31] stellt zusätzliche Anforderungen oder Erleichterungen gegenüber der Muster-Bauordnung für allgemeinbildende und berufsbildende Schulen dar. Die Anforderungen an die Bauteile sind nicht gesondert reglementiert. Das bedeutet, dass die Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung ohne Abweichungen zu übertragen sind.

4.2.9 MHochhausRL: Muster-Hochhausrichtlinie (1981)

Die Muster-Hochhausrichtlinie [32] gilt für Gebäude mit einer Gebäudehöhe > 22 m. Die brandschutztechnischen Anforderungen an die Bauteile und Baustoffe sind in Abschnitt 3 „Bauliche Ausführung“ zusammengestellt. Die Verwendung brennbarer Dämmstoffe ist demnach in Hochhäusern generell nicht erlaubt. Abnehmer der Produkte sind Firmen, die sich auf den Fertighausbau spezialisiert haben oder private Bauherren.

4.2.10 Zusammenfassung und Bewertung

Die Muster-Bauordnung mit den entsprechenden Sonderbauverordnungen und -richtlinien weist insgesamt ein vergleichsweise breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten brennbarer Dämmstoffe auf. Allein für Versammlungsstätten und Hochhäuser ist die Verwendung brennbarer Dämmstoffe grundsätzlich untersagt. Trotz dieser Möglichkeiten, beschränkt sich der Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen derzeit hauptsächlich auf den Bau von Einfamilienhäusern.

In den Anforderungen der Musterbauordnung, sowie den Sonderbauverordnungen und –richtlinien, wird bei der Verwendung von Dämmstoffen meistens zwischen nichtbrennbarer und brennbarer Dämmung unterschieden. Eine weitere Unterscheidung der brennbaren Dämmung in schwerentflammbare und normalentflammbare Dämmstoffe findet kaum statt. Die einzigen Ausnahmen bilden nichttragende Außenwände von Industriebauten, in denen eine mindestens schwerentflammbare Dämmung gefordert wird, sowie Wärmedämmverbundsysteme für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5.

4.3 Überblick der Situation bei den europäischen Normungsverfahren

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Baustoffprüfung und Baustoffklassifizierung wurden grundlegende Änderungen eingeführt. Der Gesetzgeber gibt Hinweise im Grundlagendokument „Brandschutz“ [33] sowie in der Bauproduktenrichtlinie (BPR) [34].

Für den Bereich des Brandverhaltens von Baustoffen wurden bereits vor dem Erscheinen des Grundlagendokumentes „Brandschutz“ 1994 die Entwicklung von Prüfnormen, um die Grundlagen für ein europäisches Klassifizierungssystem zu schaffen, begonnen. Obwohl im Jahre 2002 die Prüfnormen zum Brandverhalten von Baustoffen durch die DIN EN 13501 Teil 1 eingeführt wurden, blieben noch viele Fragen offen. Bis zur Klärung dieser Details hatte das nationale Klassifizierungsverfahren Bestand und wird auch zukünftig für unbestimmte Zeit parallel zum Europäischen Klassifizierungssystem weiter existieren.

Im Folgenden sollen die gesetzlichen Grundlagen für die Verwendung von Bauprodukten sowie die zur Zeit existierenden nationalen Prüfnormen einschließlich des Klassifizierungssystem zum Brandverhalten von Baustoffen dargestellt werden und mit den europäischen Anforderungen verglichen werden. [35]

4.3.1 Gesetzliche Anforderungen an Bauprodukte

Der Baubereich ist in vielen europäischen Staaten durch eigene Prinzipien und Systeme geschützt. Zur Harmonisierung technischer Regeln und der Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten der europäischen Union wurde die Bauproduktenrichtlinie [34] erlassen. Ziel war es Handelshemmnisse abzubauen und einen freien Warenhandel zu ermöglichen. Auf Basis der Bauproduktenrichtlinie wurden Grundlagendokumente zu den wesentlichen Anforderungen an Bauprodukte erarbeitet. Aufgabe der Grundlagendokumente [33] ist es eine Entscheidungshilfe zu sein, für welche Produkte sogenannte Mandate erteilt werden sollen. Ein Mandat ist der Auftrag an die CEN/ CENELEC oder die EOTA Harmonisierte Normen oder Leitlinien für europäische Zulassungen (ETAG) zu erarbeiten.

Wie jede EG-Richtlinie musste auch die Bauproduktenrichtlinie in nationales Recht umgesetzt werden. Dies geschah durch das Bauproduktengesetz und die Novellierung der Bauordnungen mit den ihnen nachgeordneten Rechts- und Verwaltungsvorschriften. Nach den Anforderungen des Gesetzes dürfen Bauprodukte und Bauarten nur eingesetzt oder verwendet werden, wenn sie den Anforderungen des Gesetzes entsprechen. Diese Anforderungen werden entsprechend den Bauordnungen in der jeweils gültigen Fassung der Bauregelliste (BRL) [36] vorgeschrieben und sind zu beachten. Bild 69 zeigt den schematischen Ablauf der Baugesetzgebung, die in den folgenden Kapiteln 4.3.1.1 bis 4.3.1.12 näher erläutert wird.

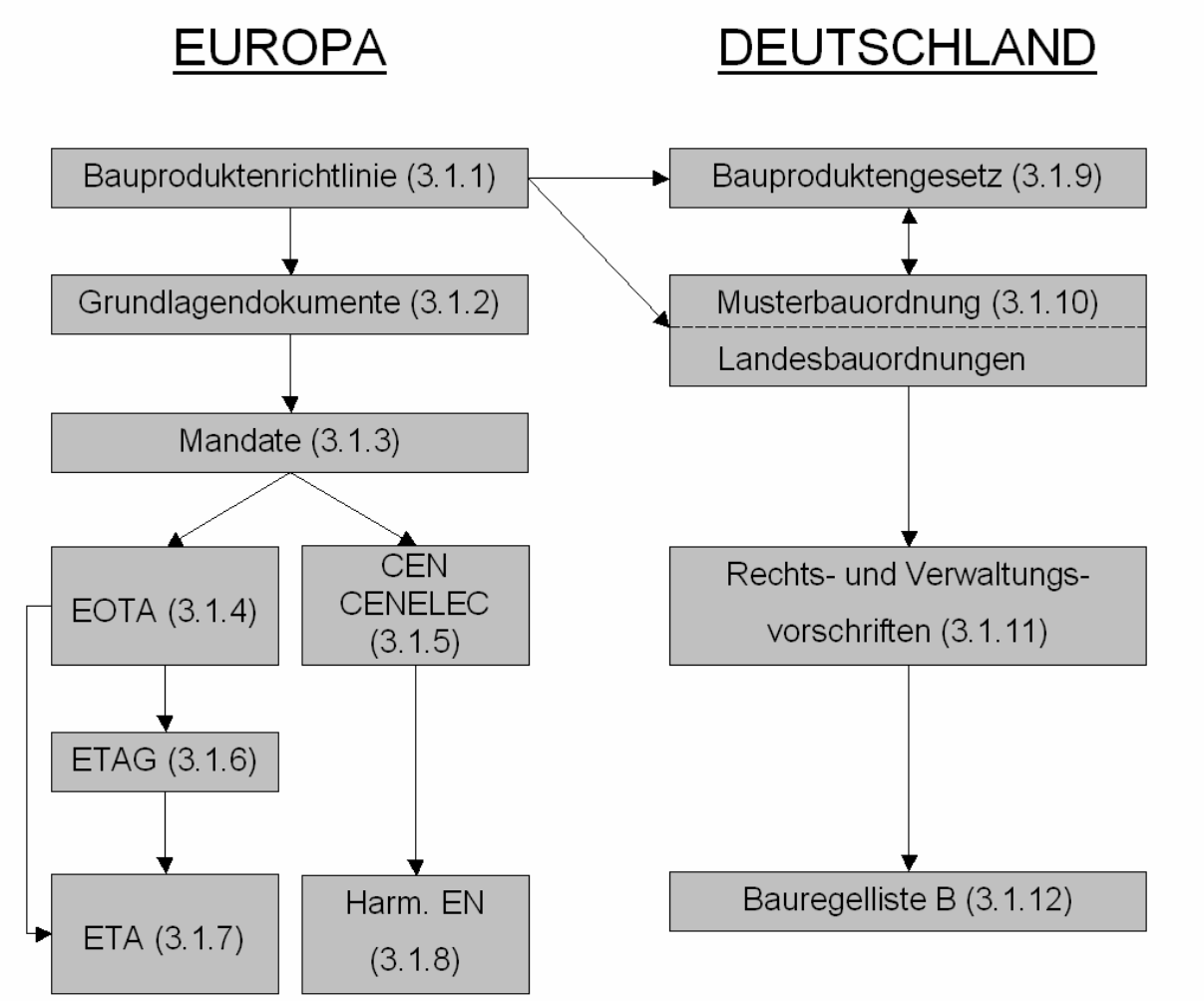


Bild 69: Darstellung des europäischen Harmonisierungskonzeptes

4.3.1.1 Bauproduktenrichtlinie

Die Bauproduktenrichtlinie [36] regelt das Inverkehrbringen, den freien Handel und die Verwendung von Bauprodukten. In der Richtlinie wird die Brauchbarkeit in Abhängigkeit von 6 wesentlichen Anforderungen festgeschrieben. Die Anforderungen sind:

Mechanische Festigkeit

Brandschutz

Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz

Nutzungssicherheit

Schallschutz

Energieeinsparung und Wärmeschutz

4.3.1.2 Grundlagendokumente

Die Grundlagendokumente [33] konkretisieren die prinzipiellen Anforderungen der Bauprodukte. Sie sollen die entsprechenden Eigenschaften haben, dass die fertig gestellten Bauwerke die wesentlichen Anforderungen erfüllen und der BPR eine konkrete Form geben. Sie bilden die Grundlage für Mandate und harmonisierte Normen und sollen dementsprechend als Leitlinien dienen. Folgende Gliederung dient als Aufbau für jedes der sechs Dokumente:

Tabelle 120: Gliederung der sechs Grundlagendokumente

Abschnitts-nummer	Inhalt
1	Allgemeines
2	erläuternde Angaben zu wesentlichen Anforderungen
3	Festlegungen, die den Nachweis zur Erfüllung der in Abschnitt 2 genannten Anforderungen aufzeigt
4	Angaben zu EN, ETA und ETAG *4.1 Allgemeines* *4.2 Bestimmungen für Bauwerke oder ihre Teile* *4.3 Bestimmungen für die Bauprodukte*
5	Nutzungsdauer, Dauerhaftigkeit

4.3.1.3 Mandate

Die Mandate sind Anweisungen der Europäischen Kommission an die unabhängigen Europäischen Normungsgremien (CEN, CENELEC und ETSI). Die Kommission überträgt ihnen die Verantwortung, harmonisierte Normen auszuarbeiten. In den Mandaten ist die Verwendungsbestimmung für Produkte angeführt, während die technischen Details in den harmonisierten Normen von CEN, CENELEC oder ETSI ausgearbeitet werden.

Die Brauchbarkeit für abweichende Produkte muss durch eine Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval - ETA) nachgewiesen werden. Auch diese Mandate zum Ausarbeiten von ETA-Leitlinien für europäisch technische Zulassungen werden durch die Europäische Kommission erteilt.

4.3.1.4 EOTA

Hauptaufgabe der EOTA (European Organisation of Technical Approval) ist es, für Produkte, die nicht in den Normen berücksichtigt werden und die einzigartig und innovativ sein können eine Leitlinien zur europäischen Zulassung (European Technical Approval Guideline – ETAG) zu erarbeiten und die Erteilung von europäischen technischen Zulassungen zu koordinieren. Sie arbeiten eng mit der Europäischen Kommission, EFTA, CEN, Europäischen Handelsvertretungen und Industrieverbänden zusammen.

4.3.1.5 CEN / CENELEC

Das CEN (Comité Européen de Normalisation – Europäisches Komitee für Normung) und CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electro-

technique – Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) sind zuständig für die europäische Normung. Im CEN sind die nationalen Normungsorganisationen aus den 25 Mitgliedstaaten der Europäischen Union und der Europäischen Freihandelsassoziation (Island, Norwegen, Schweiz, Liechtenstein) zusammengeschlossen. Gemeinsam sind die beiden Komitees dazu beauftragt, Normen auszuarbeiten, die als Unterstützung beim Nachweis der Übereinstimmung von Produkten mit den wesentlichen Anforderungen der relevanten europäischen Richtlinien dienen können.

4.3.1.6 ETAG

Die Leitlinie, die als Grundlage für die europäisch technische Zulassung (ETA) dient, wird auch als ETAG bezeichnet.

4.3.1.7 ETA

Die ETA ist die Europäische Technische Zulassung und dient als Nachweis der Brauchbarkeit eines Produkts, das noch nicht normbar ist oder wesentlich von den harmonisierten Normen abweicht. Sie beruht auf Prüfungen und einer technischen Beurteilung durch Stellen, die von den Mitgliedstaaten der EU bestimmt worden sind (EOTA).

4.3.1.8 Harmonisierte EN-Norm

Die BPR [37] sieht als alleinige Grundlage für die CE-Kennzeichnung von Bauprodukten harmonisierte technische Spezifikationen vor. Diese können harmonisierte europäische Normen (hEN) sein, die gemäß den Mandaten der Kommissionen der Europäischen Kommission erstellt werden oder europäische technische Zulassungen sein, die von der EOTA erstellt werden.

Diese Mandate werden unter Berücksichtigung der Grundlagendokumente erstellt.

4.3.1.9 Bauproduktengesetz

Das Inverkehrbringen und der freie Warenhandel wurden durch das Bauproduktengesetz in nationales Recht umgesetzt. Es regelt u.a. die Brauchbarkeit von Bauprodukten, die Vorgehensweise bei europäischen technischen Zulassungen sowie Konformitätsnachweise und enthält Aussagen über Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen sowie die CE- Kennzeichnung. Im Einzelnen gilt

<u>Zweck (§ 1)</u>

Die Vorschriften dieses Gesetzes regeln das Inverkehrbringen von Bauprodukten und den freien Warenverkehr mit Bauprodukten von und nach den Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder einen anderen Vertragsstaat des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum zur Umsetzung der BPR.

Anwendungsbereich (§ 3)

(1) Die Vorschriften dieses Gesetzes gelten für Bauprodukte, für die

1. die Kommission der Europäischen Gemeinschaften die Fundstellen der harmonisierten oder anerkannten Normen im Amtsblatt der EG veröffentlicht hat,

2. Leitlinien für die europäische technische Zulassungen erarbeitet sind,

3. europäische technische Zulassungen, ohne dass Leitlinien erarbeitet sind, nach § 5 Abs. 4 Satz 2 in Verbindung mit § 6 Abs. 4 Satz 2 erteilt werden können,

4. die wesentlichen Anforderungen nach § 5 Abs. 1 nur eine untergeordnete Bedeutung haben und die die Kommission der EG in einer Liste erfasst hat.

Allgemeine Anforderungen (§ 4)

(1) Ein Bauprodukt darf nur in den Verkehr gebracht und frei gehandelt werden, wenn es brauchbar nach § 5 und auf Grund nachgewiesener Konformität nach § 8 mit der CE- Kennzeichnung nach § 12 Abs. 1 gekennzeichnet ist.

(2) Ist in bekannt gemachten harmonisierten Normen oder .... europäischen technischen Zulassungen nichts anderes bestimmt, darf ein Bauprodukt auch dann in den Verkehr gebracht werden, wenn sich seine Brauchbarkeit und Konformität aus anderen Rechtsvorschriften ergibt, ... dieses Bauprodukt darf die CE- Kennzeichnung nach § 12 Abs. 1 nicht tragen.

Brauchbarkeit (§ 5)

(1) Ein Bauprodukt ist brauchbar, wenn es solche Merkmale aufweist, dass die bauliche Anlage für die es verwendet werden soll, bei ordnungsgemäßer Instandhaltung dem Zweck entsprechend während einer angemessenen Zeitdauer und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit gebrauchstauglich ist und die wesentlichen Anforderungen

mechanische Festigkeit und Standsicherheit

Brandschutz

Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz

Nutzungssicherheit

Schallschutz

Energieeinsparung und Wärmeschutz

erfüllt.

(2) Ein Bauprodukt gilt als brauchbar, wenn es bekannt gemachten harmonisierten oder anerkannten Normen entspricht oder von diesen nur unwesentlich abweicht.

(3) Weicht ein Bauprodukt nicht nur unwesentlich von einer bekannt gemachten harmonisierten oder anerkannten Norm .... ab, ist die Brauchbarkeit durch eine europäische technische Zulassung nach § 6 nachzuweisen. ....

(4) Sind für ein Bauprodukt weder harmonisierte noch anerkannte Normen bekannt gemacht, ist die Brauchbarkeit durch eine europäische technische Zulassung nach § 6 nachzuweisen. ....

Europäische technische Zulassung (§ 6)

Auf schriftlichen Antrag des Herstellers erteilt die zuständige Stelle .... für ein Bauprodukt eine europäische technische Zulassung, wenn das Bauprodukt brauchbar ist.

In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur Erlangung einer europäischen technischen Zulassung dargestellt.

Konformitätsnachweisverfahren (§ 8)

(1) Ein Bauprodukt, dessen Brauchbarkeit sich nach bekannt gemachten oder anerkannten Normen oder nach europäischen technischen Zulassungen richtet, bedarf einer Bestätigung seiner Übereinstimmung (Konformität) ....

(2) Das Nachweisverfahren der Konformität kann bestehen aus:

1. Erstprüfung des Bauprodukts durch den Hersteller,
2. Erstprüfung des Bauprodukts durch die Prüfstelle,
3. Prüfungen von im Werk entnommenen Proben nach festgelegten Prüfplan durch den Hersteller oder eine Prüfstelle,
4. Stichprobenprüfung von im Werk, im freien Verkehr oder auf der Baustelle entnommenen Proben durch den Hersteller oder eine Prüfstelle,
5. Prüfung von Proben aus einem zur Lieferung anstehenden oder gelieferten Los durch den Hersteller oder eine Prüfstelle,
6. ständige Eigenüberwachung der Produktion durch den Hersteller (werkseigene Produktionskontrolle),
7. Erstinspektion des Werkes und der werkeigenen Produktionskontrolle durch eine Überwachungsstelle oder
8. laufende Überwachung, Beurteilung und Auswertung der werkeigenen Produktionskontrolle durch eine Überwachungsstelle.

Die Verfahren nach Satz 1 Nr. 1 bis 8 können entsprechend an das Bauprodukt und seine Eigenschaften miteinander verbunden werden. ....

Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (§ 11)

Die nach Landesrecht zuständige oder von der Landesregierung bestimmte Anerkennungsbehörde kann auf schriftlichen Antrag eine Person, Stelle oder Überwachungsgemeinschaft als

1. Prüfstelle für einen Brauchbarkeitsnachweis nach § 9
2. Prüfstelle für die Verfahren nach § 8
3. Überwachungsstelle für die Verfahren nach § 8
4. Zertifizierungsstelle für die Bestätigungen nach § 8 und der Erteilung des Konformitätszertifikats nach § 10

anerkennen, ...

CE- Kennzeichnung (§ 12)

(1) Das Konformitätszeichen nach dem Gesetz ist die CE- Kennzeichnung. ....

(2) Ein Bauprodukt, dass die CE- Kennzeichnung nach Absatz 1 trägt, hat die widerlegbare Vermutung für sich, dass es im Sinne des § 5 brauchbar ist und dass die Konformität nach § 8 nachgewiesen worden ist. [38]

4.3.1.10 Musterbauordnung

Die Vorgaben der Bauproduktenrichtlinie zur Verwendung der Bauprodukte in nationales Recht umzusetzen, obliegt nicht dem Bund, sondern ist der Kompetenz der Länder zuzuordnen, die dazu ihre Bauordnungen überarbeiten müssen. Als ein erster Schritt wurde dazu auf Beschluss der Bauministerkonferenz die Musterbauordnung novelliert, die weisenden Charakter für alle Landesbauordnung hat.

Für die Verwendbarkeit von Bauprodukten heißt es in § 20 der MBO [24]:

(1) Bauprodukte dürfen für die Errichtung, Änderung und Instandhaltung baulicher Anlagen nur verwendet werden, wenn sie für den Verwendungszweck

1. von den nach Absatz 2 bekannt gemachten technischen Regeln nicht oder nicht wesentlich abweichen (geregelte Bauprodukte) oder nach Absatz 3 zulässig sind und wenn sie aufgrund des Übereinstimmungsnachweises nach §24 das Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) tragen nach den Vorschriften

   a) des Bauproduktengesetzes (BauPG)

   b) zur Umsetzung der Richtlinie 89/106 EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (Bauproduktenrichtlinie) vom 21. Dezember 1988 .... oder

c) zur Umsetzung sonstiger Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften, soweit diese die wesentlichen Anforderungen nach § 5 Abs. 1 der BauPG berücksichtigen,

in den Verkehr gebracht und gehandelt werden dürfen, insbesondere das Zeichen der Europäischen Gemeinschaften (CE-Zeichen) tragen und dieses Zeichen die nach Absatz 7 Nr. 1 festgelegten Klassen- und Leistungsstufen aufweist.

(2) Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT) macht im Einvernehmen mit der obersten Bauaufsichtbehörde für Bauprodukte .... in der Bauregelliste A die technischen Regeln bekannt., die zur Erfüllung der in diesem Gesetz .... an bauliche Anlagen gestellten Anforderungen erforderlich sind. Diese technischen Regeln gelten als technische Baubestimmungen im Sinne des § 3 Abs. 3 Satz 1.

(3) Bauprodukte, für die technische Regeln in der Bauregelliste A nach Absatz 2 bekannt gemacht worden sind und die von diesen wesentlich abweichen oder für die es Technische Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik nicht gibt (nicht geregelte Bauprodukte) müssen

eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis oder

eine Zustimmung im Einzelfall

haben. Ausgenommen sind Bauprodukte, die .... nur eine untergeordnete Bedeutung haben und die das DIBT .... in einer Liste C öffentliche bekannt gemacht hat. ....

(7) Das DIBT kann im Einvernehmen mit der obersten Bauaufsichtbehörde in der Bauregelliste B festlegen, welche Klassen und Leistungsstufen, die in Normen, Leitlinien oder europäischen technischen Zulassungen nach dem Bauproduktengesetz .... Bauprodukte nach Absatz 1 Nr. 2 erfüllen müssen, und bekannt machen, inwieweit andere Vorschriften zur Umsetzung von Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften die wesentlichen Anforderungen nach § 5 Abs. 1 BauPG nicht berücksichtigen. [38]

4.3.1.11 Rechts- und Verwaltungsvorschriften

Zur näheren Erläuterung der allgemeinen Anforderungen der Landesbauordnungen können die Länder Erläuterungen, zusätzliche Anforderungen oder Erleichterungen in nachgeordneten Rechts- und Verwaltungsvorschriften formulieren. Hierzu zählen die Durchführungsverordnung der Landesbauordnung, sowie Sonderverordnungen wie die Industriebaurichtlinie oder die Hochhausrichtlinie.

4.3.1.12 Bauregelliste

Die BRL [36] ist als technische Baubestimmung eingeführt und wird vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBT) in Abstimmung mit den Obersten Bauaufsichtsbehörden und unter Beteiligung anderer relevanter Gremien wie z. B. Normung, Prüfinstitute oder Industrieverbänden bekannt gege-

ben. Sie enthält Vorgaben sowohl für die Verwendbarkeit von Bauprodukten, die sich auf nationale Normen beziehen als auch für Produkte, für die bereits nationale und europäische Normen angewendet werden können.

Die BRL erfasst alle möglichen Bauprodukte und Bauarten und unterscheidet zwischen geregelten und ungeregelten Bauprodukten.

In den Tabellen für geregelte Bauprodukte (Bauregelliste A Teil 1) ist

die Bezeichnung des Bauproduktes/Bauart,

die technische Regel/Norm zur Beschreibung,

der erforderliche Übereinstimmungsnachweis sowie

der Verwendbarkeitsnachweis bei einer wesentlichen Abweichung von der technischen Regel

angegeben.

Für nicht geregelte Bauprodukte und Bauarten enthalten die Tabellen der Bauregelliste A Teil 2 und 3 folgende Angaben:

die Bezeichnung des Bauproduktes/Bauart,

den erforderlichen Verwendbarkeitsnachweis,

die anerkannte technische Regel für das Prüfverfahren sowie

den Übereinstimmungsnachweis.

In der Bauregelliste B werden Bauprodukte aufgenommen, die entsprechend der Vorschriften der Mitgliedstaaten – einschließlich deutscher Vorschriften – in den Verkehr gebracht und gehandelt werden dürfen und die eine CE - Kennzeichnung tragen. In der Bauregelliste B wird unterschieden

Bauprodukte im Geltungsbereich von Leitlinien für europäische Zulassungen

Bauprodukte im Geltungsbereich harmonisierter Normen nach der Bauprodukten-Richtlinie

Bauprodukte, für die eine europäische Zulassung ohne Leitlinie erteilt worden ist.

Die in der Bauregelliste C aufgeführten Bauprodukte müssen lediglich die Anforderungen der Normalentflammbarkeit nach DIN 4102 (B2) erfüllen.

Nach BRL ist ein Verwendbarkeitsnachweise entweder durch eine Zulassung zu führen, wenn das geregelte Bauprodukt im wesentlichen von der technischen Regel abweicht, oder bei nicht geregelten Bauprodukten/Bauarten durch ein Prüfzeugnis.

Der Übereinstimmungsnachweis kann in Abhängigkeit von der Erfüllung bauaufsichtlicher Anforderungen unterschieden werden in

ÜH = Übereinstimmungserklärung des Herstellers

ÜHP = Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach vorheriger Prüfung des Bauproduktes durch eine anerkannte Prüfstelle

ÜZ = Übereinstimmungszertifikat durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle [38]

4.3.2 Liste der Technischen Baubestimmungen

Technische Baubestimmungen sind von den obersten Baubehörden der Bundesländer erlassene bautechnische Regelwerke, zumeist Normen. Die oberste Baubehörde eines Bundeslandes kann technische Baubestimmungen erlassen, um die in den Landesbauordnungen beschriebenen öffentlichen Belange (z. B. öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben oder Gesundheit) wahren zu helfen. Technische Baubestimmungen sind verbindlich. Sie gelten im Sinne des Bauordnungsrechts als allgemein anerkannte Regeln der Technik. Normen können durch eine bauaufsichtliche Einführung zur technischen Baubestimmung erhoben werden. Die bauaufsichtliche Einführung erfolgt über die Liste der technischen Baubestimmungen. Das Deutsche Institut für Bautechnik hat die Aufgabe, im Auftrag der Länder die Einführung der Liste der Technischen Baubestimmungen vorzubereiten. Die Liste der Technischen Baubestimmungen enthält Technische Regeln für die Planung, Bemessung und Konstruktion baulicher Anlagen und ihrer Teile. Alle Technischen Baubestimmungen werden in der "Liste der Technischen Baubestimmungen" in regelmäßigen Abständen mittels Runderlass in den Amtsblättern der Länder veröffentlicht. Die in dieser Liste enthaltenen Normen und Richtlinien usw. sind somit bei allen Bauaufgaben verbindlich anzuwenden.

4.3.3 Gegenüberstellung der nat. und europ. Baustoffklassifizierung

4.3.3.1 Nationales Klassifizierungsverfahren nach DIN 4102-1

Nach deutschem Bauordnungsrecht werden Baustoffe hinsichtlich ihres Brandverhaltens in nichtbrennbare und brennbare Baustoffe unterteilt. Diese beiden Zuordnungen unterteilen sich entsprechend DIN 4102 Teil 1 [39] in weitere Klassen, so dass national fünf unterschiedliche Baustoffklassen vorhanden sind:

Tabelle 121: nationale Baustoffklassen

Nichtbrennbar:	**Brennbar:**
Baustoffklasse A1 (nichtbrennbar)	Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar)
Baustoffklasse A2 (nichtbrennbar)	Baustoffklasse B2 (normalentflammbar)
	Baustoffklasse B3 (leichtentflammbar)

Um das Brandverhalten der Baustoffe prüfen und klassifizieren zu können, werden Prüfverfahren und Prüfkriterien in DIN 4102-1 einheitlich geregelt. Dabei werden 3 Brandphasen modellhaft nachgebildet:

die Zündung durch ein Streichholz

der Entstehungsbrand in der Größenordnung eines brennenden Papierkorbes

und der voll entwickelte Brand.

Bild 70 zeigt schematisch den modellhaften Brandverlauf. Es ist zu erkennen, dass brennbare Baustoffe vor dem sogenannten flashover geprüft werden, und nichtbrennbare Baustoffe danach, also im Vollbrand geprüft werden. Baustoffe der Baustoffklasse A werden in der sogenannten Ofenprüfung geprüft. Diese stellt die Situation eines fortentwickelten bis voll entwickelten Brandes dar. Unter dieser Beanspruchung müssen die Wärmeabgabe und die Rauchentwicklung unbedenklich sein, brennbare Gase dürfen nicht freigesetzt werden. Der Baustoffklasse A1 werden nur Materialien zugeordnet, wenn sie ausschließlich aus nichtbrennbaren Stoffen bestehen. Ein Material der Baustoffklasse A2 enthält zwar brennbare Bestandteile in geringen Mengen, ist aber nicht brennbar. Ein Beispiel hierfür sind Gipskartonplatten.

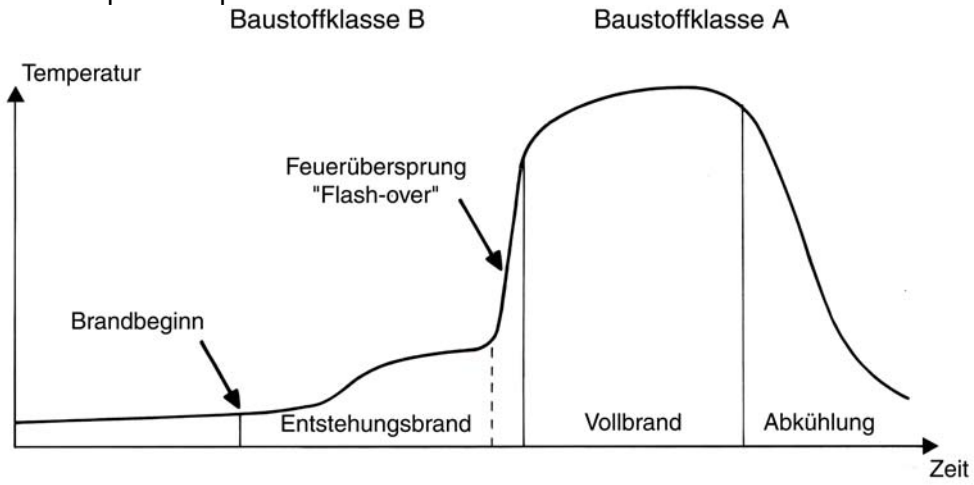


Bild 70: schematischer Brandverlauf

Baustoffe der Baustoffklasse B1 werden in dem in DIN 4102 Teil 15 [40] beschriebenen Brandschacht geprüft. Die Prüfung stellt modellhaft den Brand eines Papierkorbes dar. Unter dieser Beanspruchung müssen die Flammenausbreitung und die Wärmeabgabe begrenzt sein. Die Prüfung von Baustoffen der Baustoffklasse B2 erfolgt im Brennkasten nach DIN 50050-1. Die Prüfung stellt die Beanspruchung durch eine Streichholzflamme dar. Die Entzündbarkeit und die Flammenausbreitung müssen in einem bestimmten Zeitraum begrenzt sein.

Baustoffe, welche die Prüfungen für die Baustoffklassen B1 und B2 nicht bestehen, werden automatisch in die Baustoffklasse B3 eingestuft. Materialien der Baustoffklasse B3 dürfen laut Musterbauordnung nicht eingesetzt werden:

§ 26 (1)... [2]Baustoffe, die nicht mindestens normalentflammbar sind (leichtentflammbare Baustoffe), dürfen nicht verwendet werden; dies gilt nicht, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leichtentflammbar sind.

Für den Nachweis des Brandverhaltens ist es erforderlich, dass jeder Baustoff ebenfalls die Anforderungen der niedrigeren Klassen erfüllt. So sind z. B. für den Nachweis der Schwerentflammbarkeit für einen Baustoff ebenso die Prüfungen zur Normalentflammbarkeit erforderlich. Für die Erlangung einer Baustoffklasse sind die Nachweise entsprechend Tabelle 122 zu führen.

Tabelle 122: Anforderungen an Baustoffe nach DIN 4102 Teil 1

Prüfverfahren	Klassen nach DIN 4102					Anmerkung
	A1	A2	B1	B2	B3	
Nichtbrennbarkeitsofen	X	X				
Brandschacht		X	X			ggf. zusätzliche Angaben für B1: - brennendes Abtropfen - starke Rauchentwicklung
Heizwert und Wärmeentwicklung		X				als alternativer Nachweis für den Nichtbrennbarkeitsofen bei A2
Rauchentwicklung bei Verschwelung		X				
Rauchentwicklung bei Flammenbeanspruchung		X				
Toxikologie		X				Prüfung ist optional
Kleinbrennertest				X	X*	ggf. zus. Angaben für B2: - brennendes Abtropfen

X* Anforderungen für die Normalentflammbarkeit (B2) wurden nicht erfüllt

Tabelle 123 zeigt eine Zusammenstellung ausgewählter Baustoffe, die nach DIN 4102-1 geprüft wurden und in DIN 4102-4 als klassifizierte Baustoffe aufgeführt sind.

Tabelle 123: Baustoffklassen fester Baustoffe gemäß DIN 4102 Teil 1 und 4

Feste Baustoffe gemäß DIN 4102 Teil 1 und 4 - Auszugsweise aus DIN 4102 und ohne Gewähr-			
Baustoff-klasse	Bauaufsichtliche Benennung	Eigenschaften	Beispiele
A	**Nichtbrennbare, feste Baustoffe**	**können nicht zur Entflammung gebracht werden, sie verkohlen und veraschen nicht**	
A 1	Nichtbrennbare, feste Baustoffe		
A 2	Nichtbrennbare, feste Baustoffe		Nach DIN 4102 Teil 1 geprüft und klassifiziert oder in DIN 4102 Teil 4 aufgeführte Stoffe der Baustoffklasse A2; z. B. Gipskartonbauplatten mit geschlossener Oberfläche nach DIN 18180
B	**Brennbare, feste Stoffe**	**können durch die Flamme eines Streichholzes entflammen**	
B 1	Schwer-entflammbare, brennbare, feste Baustoffe	können nur schwer zur Entflammung gebracht werden. Abbrand nur bei zusätzlicher Wärmezufuhr mit geringer Geschwindigkeit	Nach DIN 4102 Teil 1 geprüft und klassifiziert oder in DIN 4102 Teil 4 aufgeführte Stoffe der Baustoffklasse B1; z. B. Holzwolle-Leichtbauplatten (DIN 1101), Gipskartonbauplatten mit gelochter Oberfläche nach DIN 18180, Wärmedämmputzsysteme nach DIN 18850 T3, Eichenparkett (DIN 280 T 1)
B 2	Normal-entflammbare, brennbare, feste Baustoffe		Nach DIN 4102 Teil 1 geprüft und klassifiziert oder in DIN 4102 Teil 4 aufgeführte Stoffe der Baustoffklasse B2; z. B. übliche Holz- und Holzwerkstoffe, Gipskartonverbundplatten (DIN 18184), genormte Bitumenbahnen, PVC, Polyurethan
B 3	Leicht-entflammbare, brennbare, feste Baustoffe	können durch die Flamme eines Streichholzes entflammen und brennen selbständig und schnell ohne zusätzliche Wärmezufuhr ab	

4.3.3.2 Europäische Klassifizierung nach DIN EN 13501-1

Nach den Vereinbarungen mit der Europäischen Kommission werden Baustoffe zum Brandverhalten in sieben sogenannte Euroklassen unterteilt. Nach DIN EN 13501-1 [41] sind die Klassenbezeichnungen für Bauprodukte A1, A2, B, C, D, E und F. Für die Einstufung von Bodenbelägen sind analoge Klassenbezeichnungen vorhanden auf die nicht näher eingegangen wird. Den für die Prüfung der Baustoffe erforderlichen Prüfnormen ist

zugestimmt worden. Das Gesamtpaket der Prüfnormen kann bereits seit Jahren angewendet werden, da die Klassifizierungsnorm DIN EN 13501-1 als gültiger Nachweis in die Bauregelliste aufgenommen wurde. Durch die Benennung der Prüfnormen als Nachweismethode in der Klassifizierungsnorm sind die Prüfnormen ebenso eingeführt. Dies erfolgte durch die Veröffentlichung in der Bauregelliste. Für die Erlangung der europäischen Baustoffklassen sind die Nachweise nach Tabelle 124 erforderlich.

Tabelle 124: Anforderungen an die Baustoffe nach DIN EN 13501-1

		Klassen nach DIN EN 13501-1						
Prüfverfahren	Prüfnorm	A1	A2	B	C	D	E	F
Nichtbrennbarkeitsofen	DIN EN ISO 1182	X	X*					
Heizwert	DIN EN ISO 1716	X	X*					
SBI	DIN EN 13823		X	X	X	X		
Kleinbrennertest	DIN EN ISO 11925-2			X	X	X	X	X**

X* bei der Baustoffklasse A2 kann zwischen den Verfahren gewählt werden
X** die Anforderungen für die Baustoffklasse E wurden nicht erreicht

Durch die europäischen Prüfungen werden die gleichen Brandphasen wie bei der nationalen Prüfung nach DIN 4102-1 nachgebildet.

brennendes Streichholz => Kleinbrennertest

brennender Papierkorb => SBI

voll entwickelter Brand => Nichtbrennbarkeitsofen

Zusätzlich zu den Baustoffklassen A1 bis F sind bei der Prüfung im SBI (DIN EN13823 [42]) und im Kleinbrennertest (DIN EN ISO 11925-2 [43]) die Rauchentwicklung und das brennende Abtropfen zu bewerten. Nach DIN EN 13501-1 [41] werden für Bauprodukte, sowohl hinsichtlich der Rauchentwicklung die Klassen s1, s2 und s3, als auch für das brennende Abfallen die Klassen d0, d1 und d2 für eine abschließende Klassifizierung erforderlich.

Für die Feststellung, ob und wie ein Produkt nach europäischer Klassifizierung in die Systematik der DIN 4102 passt, wurden die verwendeten Prüfverfahren verglichen. Die Ergebnisse des Nichtbrennbarkeitsofen nach DIN EN ISO 1182 [44] stimmten weitestgehend mit den Ergebnissen aus dem Nichtbrennbarkeitsofen nach DIN 4102 überein. Die Ermittlung des Heizwertes bzw. des Brennwertes wurde bereits nach DIN EN ISO 1716 [45] durchgeführt. Unterschiede bestehen lediglich darin, dass bei den Prüfungen sowohl im Nichtbrennbarkeitsofen als auch bei der Ermittlung des Brennwertes/Heizwertes unterschiedliche Grenzwerte einzuhalten sind. Die gleichen Aussagen treffen auf die DIN EN ISO 11925-2 zu. Dieses Prüfverfahren entspricht dem Kleinbrennertest nach DIN 4102-1. Bei der Prüfung für die Baustoffklassen B, C und D werden die Beflammungsdauern gegenüber den Vorgaben der DIN 4102-1 verlängert. Für die Prüfung der Baustoffklasse E (DIN EN 13501-1) und B2 (DIN 4102-1) bestehen keine Unterschiede.

Lediglich das Prüfverfahren nach DIN EN 13823, der sogenannte SBI-Test (Single Burning Item) [46], stellt eine Neuerung dar und soll das Brandschachtverfahren nach DIN 4102-16 ersetzen. Bei der Prüfung im SBI be-

flammt ein Gasbrenner in einer Ecke die vertikal angeordneten Proben. Bei dem Versuch wird die vertikale Brandausbreitung, die Energiefreisetzung und die Rauchentwicklung erfasst. Zusätzlich wird das Abfallen brennender Teile beurteilt. Aus einem Vergleich der Prüfanordnungen ergibt sich, dass sowohl im Brandschacht als auch beim SBI die Proben vertikal angeordnet sind und die Proben im unteren Bereich beflammt werden. Das durch den SBI-Test erfasste Feuerszenario stellt die Ermittlung des potentiellen Beitrags eines Bauproduktes zu einem sich entwickelnden Brand, bei einem einzelnen brennenden Gegenstand (SBI) in einer Raumecke dar. Dieses Szenario stimmt mit dem Brandszenario für das Brandschachtverfahren weitestgehend überein. Baustoffe, die eine Klassifizierung über das Brandschachtverfahren erreicht haben, erreichen durch die Einstufung über das SBI-Verfahren im allgemeinen äquivalente Klassen.

Als wesentliche Abweichung des SBI-Tests im Vergleich zum Brandschachttest ist zu nennen, dass das Glimmverhalten der Baustoffe nicht untersucht wird. Zur Einstufung in die Baustoffklasse B1 ist es in Deutschland jedoch erforderlich, dass der Nachweis geführt wird, dass ein Baustoff nicht zum Glimmen neigt. Das Glimmverhalten wird national im Brandschacht über die Restlänge der Probekörper beurteilt, die nach Ende der Beflammung selbsttätig verlöschen müssen. Im SBI-Test werden hierzu jedoch keine Untersuchungen durchgeführt. Für Deutschland werden die Anforderungen an das Glimmverhalten allerdings bestehen bleiben. Derzeit müssen daher Baustoffe die eine europäische Zulassung der Klassen B oder C erreichen wollen zusätzlich den Brandschachttest absolvieren und belegen, dass sie nicht zum Glimmen neigen. Es bestehen jedoch Bestrebungen, dies zukünftig durch ein längeres Verbleiben des zu untersuchenden Materials in der Prüfanordnung des SBI nach Versuchende zu gewährleisten. Weitere Informationen hierzu sind in Kapitel 4.7 enthalten.

Durch die Festlegungen der DIN EN 13501-1 gibt es 7 Euroklassen. Da ebenfalls die Rauchentwicklung und das brennende Abtropfen bei der Klassifizierung mit berücksichtigt wird, entstehen 40 unterschiedliche Möglichkeiten einer Baustoffklassifizierung. Die Anforderungen an Baustoffe in den nationalen gesetzlichen Regelungen erfassen nicht diese Vielfalt. Daher ist für die Anpassung der europäischen Klassen an das deutsche Baurecht und der Vergleich mit der Klasseneinteilung der Baustoffe nach DIN 4102-1 eine Zuordnungstabelle erforderlich. Diese Zuordnungstabelle wird vom DIBT in der Bauregelliste veröffentlicht und ist in Tabelle 125 wiedergegeben.

Tabelle 125: Zuordnungstabelle der bauaufsichtlichen Benennungen zu den Euroklassen [36]

Bauaufsichtliche Anforderung	Zusatzanforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 13501 – 1 (Bauprodukte, ausgenommen lineare Rohrdämmstoffe)
	Kein Rauch	Kein brenn. Abfallen/ Abtropfen	
Nichtbrennbar	X	X	A1
	X	X	A2 - s1, d0
Schwerentflammbar	X	X	B - s1, d0 C - s1, d0
		X	A2 - s2, d0 A2 - s3, d0 B - s2, d0 B - s3, d0 C - s2, d0 C - s3, d0
	X		A2 - s1, d1 A2 - s1, d2 B - s1, d1 B - s1, d2 C - s1, d1 C - s1, d2
			A2 - s3, d2 B - s3, d2 C - s3, d2
Normalentflammbar		X	D - s1, d0 D - s2, d0 D - s3, d0 E
			D - s1, d1 D - s2, d1 D - s3, d1 D - s1, d2 D - s2, d2 D - s3, d2 E - d2
Leichtentflammbar			F

Bauaufsichtliche Anforderung	Zusatzanforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 13501 – 1 (Bauprodukte, ausgenommen lineare Rohrdämmstoffe)
	Kein Rauch	Kein brenn. Abfallen/ Abtropfen	

1) In den europäischen Prüf- und Klassifizierungsregeln ist das Glimmverhalten nicht erfasst. Für Verwendungen, in denen das Glimmverhalten erforderlich ist, ist das Glimmverhalten nach nationalen Regeln nachzuweisen

Der Prüfung des Brandverhaltens der Baustoffe kommt eine große Bedeutung zu, da die bereits vorliegenden Ergebnisse zur Klassifizierung im nationalen Bereich nach DIN 4102-T1, die sogenannte „historic data“ nicht verwendet werden kann, weil sich die Prüfeinrichtungen für die europäische Klassifizierung verändert haben. Dies trifft insbesondere auf die Prüfungen im SBI zu. Für die Probenanordnung beim Versuch sind in DIN EN 13823 [42] einige Vorgaben gemacht worden. Sie zeigen lediglich die Grundsätze der Vorgehensweise auf. Spezielle Vorgaben für das „mounting und fixing“ beim SBI-Versuch fehlen noch. Die Arbeiten in den Arbeitsgruppen von CEN TC 127 dauern noch an. Damit trotzdem Baustoffe nach dem europäischen Klassifizierungssystem bewertet werden können, soll in Abstimmung mit dem DIBT auf die nationalen Erfahrungen bei der Prüfung von Baustoffen nach DIN 4102 Teil 16 [47] zurückgegriffen werden.

Die Brauchbarkeit eines Baustoffs muss die wesentlichen Anforderungen des BPG erfüllen. Somit sind Anforderungen an den Brandschutz zu stellen. Diese Anforderungen werden in harmonisierten oder anerkannten Normen dargestellt bzw. in europäisch technischen Zulassungen angegeben. Sofern die erforderlichen brandschutztechnischen Nachweise entsprechend Tabelle 124 geführt worden sind, erhalten die Produkte eine CE-Kennzeichnung für ihre Brauchbarkeit und können in den Verkehr gebracht werden. Bedingung für das Führen einer CE-Kennzeichnung ist der Nachweis der Konformität, für die es unterschiedliche Nachweisverfahren gibt. Welches Konformitätsnachweisverfahren für ein bestimmtes Produkt erforderlich ist, wird in den Mandaten für die harmonisierten Normen bzw. den Leitlinien für europäische technische Zulassungen festgelegt. Für das Brandverhalten von Baustoffen werden in der Regel die Konformitätsverfahren 1, 3 und 4 angewendet.

In der BRL werden die Klassen und die Leistungsanforderungen festgelegt, die ein Bauprodukt auch hinsichtlich seiner Anforderungen an die Baustoffklasse erfüllen muss, um einen Verwendbarkeitsnachweis zu erhalten. Weiterhin können durch den Gesetzgeber zusätzliche Anforderungen zum Nachweis der Verwendbarkeit gestellt werden, der über den Nachweis der Brauchbarkeit hinausgeht. Aus der BRL ist dann zu entnehmen, ob der Nachweis der Verwendbarkeit über eine Zulassung oder ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis geführt werden muss. Für diese zusätzlichen Anforderungen ist neben der CE-Kennzeichnung ebenso das Ü-Zeichen erforderlich. Dies führt zu einer Unübersichtlichkeit für den Bauherrn oder Planer, weil nicht die Erfahrungen vorliegen, welche Anforderungen für die Verwendbarkeit notwendig sind.

4.3.4 Zusammenfassung

Für die Einführung europäischer Normen zur Baustoffklassifizierung hat der Gesetzgeber Richtlinien geschaffen, um die Umsetzung in die Praxis zu regeln. Die Anforderungen für die Verwendbarkeit der Bauprodukte sind in der Musterbauordnung § 20 erläutert und werden in der Bauproduktenrichtlinie präzisiert. Die erforderlichen Angaben zur Vorgehensweise für Bauprodukte nach europäischen technischen Zulassungen werden angegeben. Die Gliederung der Bauregelliste zur Erlangung eines Verwendbarkeitsnachweises werden dargestellt.

Durch die Gegenüberstellung der Prüfanforderungen im nationalen Bereich (DIN 4102) und dem europäischen System (DIN EN 13501) kann gezeigt werden, dass die Anforderungen an die Baustoffe im Niveau vergleichbar bleiben. Für die praktische Umsetzung des neuen Klassifizierungssystems in die bauaufsichtlichen Benennungen der Bauordnungen wird eine Zuordnungstabelle angegeben.

Bei der Umsetzung und Anpassung des neuen Systems zum Brandverhalten von Baustoffen an die nationalen Erfordernisse, traten offene Fragen auf, die geklärt werden mussten. Da anfangs lediglich die Normen für die Prüfverfahren vorlagen, fehlten noch Festlegungen zu Detailregelungen wie z. B. zum „Mounting and Fixing“ und zum Anwendungsbereich der Prüfungen, die europäisch abgestimmt werden müssen. Dies führte dazu, dass national für die Prüfung von Baustoffen durch die Erteilung von Zulassungen erst einmal eigene Wege gegangen wurden. Zusätzliche Anforderungen hinsichtlich des Glimmverhaltens der Baustoffe sind hier zu nennen. So sind in Deutschland entsprechende Nachweise für die Euroklassen A2, B und C und in Österreich für die Klassen D und E erforderlich. Dies erfolgt über Zulassungen für nicht geregelte Produkte, die eine Klassifizierung nach DIN EN 13501-1 erhalten, aber nur national anwendbar sind. Dieser Zustand widerspricht allerdings ebenso einem harmonisierten europäischen Klassifizierungssystem. Derzeit erfolgt die Abstimmung über den Normentwurf DIN EN 15715 „Wärmedämmstoffe - Einbau- und Befestigungsbedingungen für die Prüfung des Brandverhaltens“, indem entsprechende Festlegungen zur Prüfung getroffen werden sollen.

Das zur Zeit geltende nationale Klassifizierungssystem für die Baustoffe wird in der nächsten Zeit trotz des europäischen Systems weiter seine Gültigkeit haben, weil bereits erteilte allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse weiterhin ihre Gültigkeit haben und in der Übergangszeit ebenso verlängert werden können. Da diese Nachweise in der Regel für fünf Jahre erteilt werden, sind Übergangszeiten von mehr als fünf Jahre erforderlich. Die Diskussionen in den Fachgremien u.a. bei der ARGEBAU zeigen, dass ggf. Übergangszeiten von nicht begrenzter Dauer ebenso vorstellbar sind. Sofern ein Hersteller seine Nachweise nach DIN 4102 geführt hat, kann er sie im nationalen Bereich weiter verwenden, da sich die Rechtsgrundlagen hierzu nicht verändert haben.

4.3.5 Europäische Technische Zulassung für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Für die in diesem Forschungsvorhaben behandelten Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen existiert keine Leitlinie für eine europäische technische Zulassung (ETAG). Es besteht aber trotzdem die Möglichkeit, dass europäische technische Zulassungen (ETA) erteilt werden, wenn keine Leitlinie vorhanden ist. Die Entscheidung, ob für einen Produktbereich europäische technische Zulassungen ohne Leitlinie erteilt werden dürfen, trifft die Europäische Kommission. Bei Zustimmung ist vorgesehen, dass die erteilende Zulassungsstelle (z. B. DIBt) sich mit den anderen Zulassungsstellen der EOTA über die Beurteilung der Brauchbarkeit einigt. Das DIBt muss dazu eine Beurteilungsgrundlage erstellen, die sog. CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure) mit der die Verwendbarkeit des Produkts nachgewiesen wird. Eine Zusammenstellung enthält die Liste "Produktbereiche, in denen europäische technische Zulassungen ohne Leitlinie erteilt werden können"; abrufbar unter: www.dibt.de. Einen Auszug dieser Liste, die den Produktbereich Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen betrifft enthält Tabelle 126.

Tabelle 126: Auszug der Liste „Produktbereiche, in denen europäische technische Zulassungen ohne Leitlinie erteilt werden können (DIBt)

Nr.	Produktbereiche
12.01/01	Wärmedämmstoffe aus Tierfasern (Schafwolle) Thermal insulation material and/or acoustic insulation material made of sheep's wool
12.01/02	Dämmstoffe aus Pflanzenfasern zur Schall- und Wärmedämmung Thermal insulation material and/or acoustic insulation material made of flax fibres
12.01/02bis	Dämmstoffe zur Wärmedämmung und/oder Schalldämmung aus Hanffasern Thermal insulation material and/or acoustic insulation material made of hemp fibres
12.01/02Cl1	Dämmstoffe zur Wärmedämmung und/oder Schalldämmung aus Pflanzen- oder Tierfasern Factory-made Thermal Insulation Material and/or Acoustic Insulation Material Made of Vegetable or Animal Fibres
12.01/02Cl2	Dämmstoffe zur Wärmedämmung und/oder Schalldämmung aus Pflanzen- oder Tierfasern In-situ formed loose fill thermal insulation material and/or acoustic insulation material made of vegetable or animal fibres
12.01/02mo	Lose Dämmschüttung aus Hanffasern zur Wärme- und/oder Schalldämmung für die Anwendung unter schwimmenden Fußböden In-situ formed loose fill thermal insulating material and/or acoustic insulation material made of hemp fibres to be used under floating floors
12.01/02tris	Dämmstoffe zur Wärmedämmung und/oder Schalldämmung aus Pflanzenfasern Thermal insulation material and/or acoustic insulation material made of vegetable fibres
12.01/03	Wärmedämmstoff aus Reisschalen Rice husks in bulk used as thermal insulation
12.01/04	Dämmmaterial aus vor Ort eingeblasenen Holzfasern Wood fibre insulation as boards sprayed in situ
12.01/05	Wärmedämmplatte aus mineralischem Material Thermal insulation board made of mineral material
12.01/06	Lose Hobelspäne als Dämmstoffschüttung Wood shavings in bulk to be used for thermal insulation
12.01/08	Lose Schüttung aus künstlichem Schaumglas Factory made cellular glass loose fill

Dämmstoffe, für die eine europäische technische Zulassung auf Grundlage eines CUAP-Verfahrens erstellt wurde sind in Teil II der Liste der Technischen Baubestimmungen enthalten. Im folgenden wird ein Auszug der Bauregelliste B Teil1 – Ausgabe 2007/1 wiedergegeben mit den Anlagen, die die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen betreffen.

Tabelle 127: Anwendungsregelungen für Bauprodukte, für die eine europäische technische Zulassung ohne Leitlinie erteilt worden ist (Auszug Bauregelliste B Teil 1 – Ausgabe 2007/1)

Lfd. Nr.	Bauproduktart	Europäisch technische Zulassung ohne Leitlinie*	In Abhängigkeit vom Verwendungszweck erforderliche Stufen und Klassen
4.1	Lose Schüttdämmstoffe aus pflanzlichen oder tierischen Fasern zur Wärme- und/ oder Schalldämmung		Anlage 01 und 4/8
		ETA-01/0016	Zusätzlich gilt: Anlagen 02,04 und 4/9
		ETA-04/0079 bis ETA-04/0081, ETA-05/0008, ETA-05/0191, ETA-05/0226, ETA-06/0086	Zusätzlich gilt: Anlage 04
		ETA-05/0043, ETA-05/0186 ETA-06/0076, ETA-06/0085	Zusätzlich gilt: Anlage 02 und 04
4.2	Werkmäßig hergestellte Dämmstoffe aus pflanzlichen oder tierischen Fasern zur Wärme- und/ oder Schalldämmung		Anlage 01 und 4/8
		ETA-98/0007**	Zusätzlich gilt: Anlagen 04 und 4/1
		ETA-98/0008**	Zusätzlich gilt: Anlagen 04 und4/2
		ETA-98/0009, ETA-03/0035, ETA-03/0057, ETA-05/0037,	Zusätzlich gilt: Anlage 04
		ETA-02/0008 bis ETA-02/0015, ETA-02/0034 bis ETA-02/0036, ETA-02/0038,	Zusätzlich gilt: Anlagen 02, 04 und 4/4
		ETA-03/0029, ETA-03/0030, ETA-03/0046 bis ETA-03/0048, ETA-04/0047, ETA-05/0014, ETA-05/0021, ETA-05/0087, ETA-06/0038 bis ETA-06/0042	Zusätzlich gilt: Anlagen 02 und 04

* Die aktuelle Liste „Europäische Technische Zulassungen“ (ETA) ist unter www.dibt.de abrufbar.

** Die Geltungsdauer der Europäischen Technischen Zulassung (ETA) ist abgelaufen.

Anlagen zur Bauteilregelliste B Teil 1

Anlage 01 (2007/1)

Es gelten die in den Landesbauordnungen und in den Vorschriften aufgrund der Landesbauordnungen vorgegebenen Stufen, Klassen und Verwendungsbedingungen.

Für die Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 und DIN 13501-3 zu den bauaufsichtlichen Benennungen gilt Bauregelliste A Teil 1 Anlage 0.1.2. Für die Zuordnung der nach DIN EN13501-1 klassifizierten Brandeigenschaften von Baustoffen zu den bauaufsichtlichen Benennungen gilt Bauregelliste A Teil 1 Anlage 0.2.2. Für die Zuordnung der nach DIN EN 13501-5 klassifizierten Eigenschaften zum Verhalten von Bedachungen bei einer Brandbeanspruchung von außen gilt Bauregelliste A Teil 1 Anlage 0.1.3.

Anlage 02 (2003/1)

Das Bauprodukt/ der Bausatz darf aus Gründen der Hygiene, der Gesundheit und des Umweltschutzes für Aufenthaltsräume einschließlich zugehöriger Nebenräume und für Bauteile um Kontakt mit Wasser und Boden nur verwendet werden, wenn der Nachweis der gesundheitlichen Unbedenklichkeit sowie der Umweltverträglichkeit durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung geführt wird.

Anlage 04 (2003/1)

Das Glimmverhalten von Baustoffen, die nach DIN EN 13501-1 in die Klase A2, B oder C eingestuft werden, ist zusätzlich durch Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung nachzuweisen.

Anlage 4/1 (2005/3)

Die Umsetzung europäischer Regeln für das Brandverhalten in nationales Recht stehen noch aus, weil es europäische Prüfvorschriften noch nicht gibt und die europäischen Klassen den nationalen Klassen noch nicht zugeordnet werden konnten. Deshalb muss in Deutschland zusätzlich zur europäischen technischen Zulassung ETA –98/0007 die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11E-0007 beachtet werden.

Anlage 4/2 (2005/3)

Die Umsetzung europäischer Regeln für das Brandverhalten in nationales Recht stehen noch aus, weil es europäische Prüfvorschriften noch nicht gibt und die europäischen Klassen den nationalen Klassen noch nicht zugeordnet werden konnten. Deshalb muss in Deutschland zusätzlich zur europäischen technischen Zulassung ETA –98/0008 die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11E-0008 beachtet werden.

Anlage 4/4 (2005/3)

Zum Zeitpunkt der Erteilung der europäischen technischen Zulassung war der Nachweis des Brandverhaltens aufgrund fehlender einheitlicher Festlegungen hinsichtlich Vorbereitung, Konditionierung und Einbau des Produktes in den Prüfeinrichtungen mit Ausnahme der Klasse A1 noch nicht harmonisiert. Das Brandverhalten ist deshalb bis auf weiteres mit Ausnahme der Klassen A1 im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festzulegen.

Anlage 4/8 (2006/1)

Der Dämmstoff muss hinsichtlich des Widerstandes gegenüber Schimmelpilz in die Klasse 0 eingestuft sein, es sei denn, in der europäischen technischen Zulassung sind zur Vermeidung des Schimmelpilzwachstums detaillierte konstruktive Randbedingungen festgelegt.

Anlage 4/9 (2006/1)

In der europäischen technischen Zulassung ist das Setzungsverhalten des Dämmstoffs nicht nachgewiesen. Die Verwendbarkeit ist daher im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung festzulegen.

4.4 Auswahl der Produkte

In Absprache mit den Forschungspartnern der weiteren Teilvorhaben wurde vereinbart sich bei den Untersuchungen auf eine möglichst identische Produktauswahl zu verständigen. Die vom iBMB im Teilvorhaben „Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene“ untersuchten Produkte sind in Tabelle 128 wiedergegeben.

Die Auswahl der Produkte enthält zum einen Materialien mit einem hohen Bekanntheits- und Verbreitungsgrad wie Cellulose, zum anderen aber auch neue Produkte, die sich auf dem Markt noch nicht etablieren konnten, aber viel versprechende Eigenschaften aufweisen und neue Erkenntnisse bringen könnten, wie z. B. Seegras.

Tabelle 128: Zusammenstellung der untersuchten Produkte

	Rohstoff	Produktart	Anonymisierte Produktbezeichnung
1	Flachs	Matte	Flachs-Matte K
2	Flachs		Flachs-Matte G
3	Hanf	Matte	Hanf-Matte AF
4	Hanf	Stopfwolle	Hanf-Wolle L
5	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff Q
6	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff Q (unbeh.)
7	Cellulose	Einblasdämmung	Cellulose-Einblasdämmstoff M
8	Cellulose	Platte	Cellulose-Platte M
9	Holz	Lose Späne	Holzspan-Schüttung B
10	Holz		Holzfaser-Platte M
11	Holz	Schüttung	Lehm-Holzfaserschüttung AE
12	Roggen	Schüttung	Roggen-Schüttung W
13	Schafwolle	Vlies	Schafwoll-Matte A
14	Seegras	Schüttung	Seegras-Schüttung X

4.5 Charakterisierung des Brandverhaltens im Labormaßstab

4.5.1 Untersuchungen im Cone-Kalorimeter

Beim Cone-Kalorimeter gemäß ISO 5660 [48] erzeugt ein kegelförmiger, elektrisch beheizter Strahler in der Ebene der maximal 100 cm² großen, beschichteten Probekörperoberfläche eine homogene Wärmestromdichte in einem Bereich von 0 – 100 kW/m² (maximale Strahlertemperatur: 1000 °C). Dadurch wird der darunter liegende Probekörper gleichmäßig erwärmt. Ein zusätzlicher, periodisch erzeugter Zündfunke in unmittelbarer Nähe der Probe dient zur Entzündung der infolge der Erwärmung und Zersetzung austretenden Pyrolyseprodukte. Nach der Entzündung verbrennen die Zersetzungsprodukte in einer Diffusionsflammen, die Höhen bis zu 40 cm erreichen kann. Daher ist der Versuchsaufbau aus Gründen der Arbeitssicherheit in einer von unten und oben belüfteten, mit Glastüren abgeschlossenen Kammer aufgestellt.

Bild 71 zeigt skizzenhaft den Versuchsaufbau. Oberhalb des kegelförmigen Strahlers befindet sich eine Abzugshaube mit kastenförmigem Aufsatz. Ein horizontales Rauchgasrohr mit Gasentnahmesonden verbindet den Aufsatz

mit einem Gebläse. Das Gebläse fördert die Rauchgase über ein vertikales Rohr mit Messsonden für die Massenstrombestimmung. Das Gebläse wird mit geregelter Absaugleistung betrieben. (Regelbereich 20 – 30 l/s, bezogen auf 298 K Gastemperatur) Die aus dem vertikalen Rohr austretenden Gase werden in ein Absaugsystem mit Filteranlage geführt. Dies ermöglicht die vollständige Absaugung aller in der offenen Kammer entstehenden Rauchgase. Die über die Gasentnahmesonde abgezweigten Rauchgase werden über die Gasanalysestrecke einem Sauerstoff- und einem Kohlendioxid-/ Kohlenmonoxidanalysator zugeführt. Für die Auswertung wird das Prinzip der Sauerstoffkalorimetrie angewandt, welches besagt, dass die bei der Verbrennung freigesetzte Energie proportional zum verbrauchten Sauerstoff ist. Durch die Messung der Rauchgaszusammensetzung und –menge und des Probengewichtes kann der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrate (Brandleistung), der Abbrandrate, der effektiven Verbrennungswärme sowie der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidausbeute berechnet werden. Außerdem wird der Zeitpunkt der Entzündung und die dazu gehörende Oberflächentemperatur des Probekörpers erfasst. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht es, dass vornehmlich durch die Abhängigkeit des Zündzeitpunktes und der Energiefreisetzungsrate von der eingestellten Wärmestromdichte das Abbrandverhalten von Materialien charakterisiert werden kann.

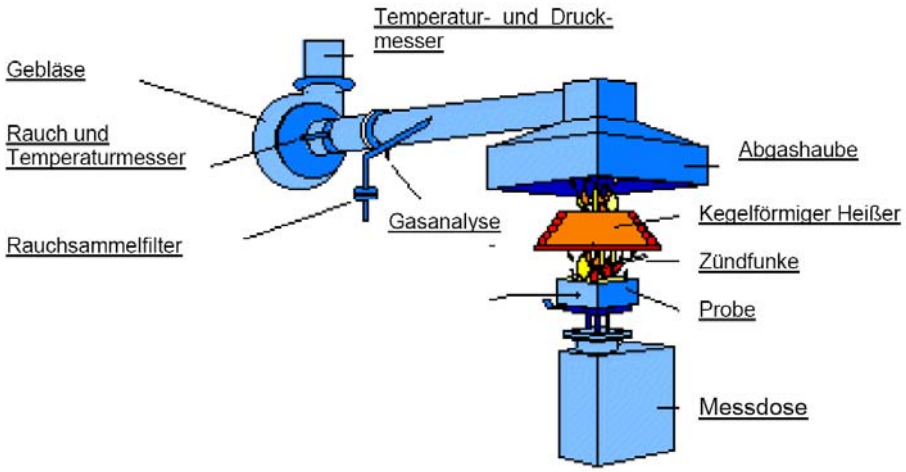


Bild 71: Darstellung des Cone-Kalorimeters

4.5.1.1 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden in Prüfrahmen aus Edelstahl hergestellt und untersucht. Die Prüfrahmen hatten die Abmessungen 100 mm x 100 mm, mit einer Tiefe von 54 mm.

Bei der Herstellung der Probekörper wurde grundsätzlich zwischen Dämmmatten und Dämmvliesen einerseits, sowie losen Einblasdämmstoffen und Dämmstoffschüttungen andererseits unterschieden.

Die Herstellung der Probekörper gestaltete sich insbesondere bei losen Dämmstoffen ungleich schwieriger als bei den Dämmmatten. Die Oberflächenstruktur eines Stoffes hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Entzündungsverhalten, deshalb musste gewährleistet werden,

dass Form und Beschaffenheit der Probekörper bei den Versuchen gleich blieben und eine möglichst glatte Oberfläche erzielt wurde.

Darum wurden ein Prüfrahmen aus Stahl und eine passende Befüllungsvorrichtung hergestellt, welche aus

einem Fundamentklotz aus Holz, der das Herausfallen des Füllgutes verhindern sollte,

einem Holzrahmen, der die Befüllung vereinfachte,

einem Stempel zur Verdichtung

und einem Aluminiumsockel bestand.

Die Herstellung der Probekörper gliedert sich in die folgenden Schritte:

Die notwendige Menge des Dämmstoffes für eine bestimmte Dichte wird ermittelt und etwas aufgelockert.

Der Prüfrahmen wird auf den Fundamentklotz gestellt und auf dem Kopf liegend locker und gleichmäßig bis zur Oberkante mit dem Dämmmaterial gefüllt (vgl. Bild 72 a bis c).

Der Holzrahmen wird auf den Prüfrahmen gesetzt und der Rest des Dämmstoffes wird eingefüllt. Anschließend wird das Material mit einem Stempel verdichtet bis es in seiner Dicke der Höhe des Stahlrahmens entspricht (vgl. Bild 72 d).

Schließlich wird der Holzrahmen entfernt und der Stahlrahmen mit dem Alusockel abgedeckt, so dass der Probekörper samt Rahmen umgedreht werden kann. So entsteht eine ebene Oberfläche (vgl. Bild 72 e).

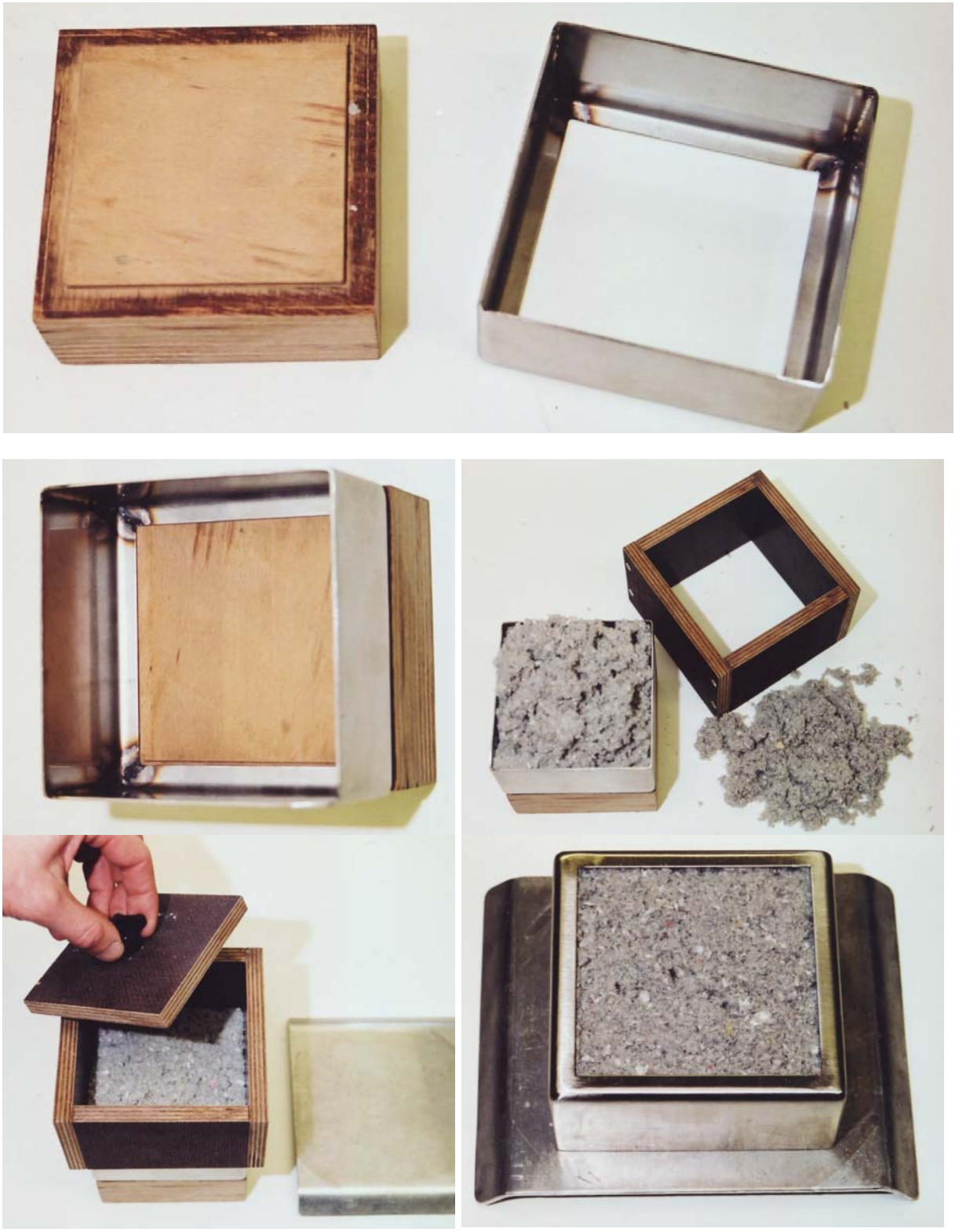


Bild 72: Herstellung der Probekörper

Die Herstellung der Probekörper aus Dämmplatten war entschieden einfacher. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden die Versuche an festen Dämmplatten ebenfalls in dem Prüfrahmen durchgeführt. Es wurde ein 100 x 100 mm² großes Stück ausgeschnitten, wobei darauf geachtet werden sollte, dass die Platte nicht zu stark zu komprimieren. Auch beim Einlegen in den Prüfrahmen sollte eine Komprimierung möglichst vermieden werden. Wird die Höhe des Prüfrahmens überschritten, so muss die Dicke der Dämmstoffplatte auf ca. 55 mm reduziert werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Prüfung die geschnittene Oberfläche auf der dem Cone-Strahler abgewandten Seite liegt, da die Probenoberfläche einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Entzündungsverhalten hat.

4.5.1.2 Versuchsdurchführung

In einem ersten Schritt sollten die zu untersuchenden Materialien hinsichtlich ihres Brandverhaltens grundsätzlich charakterisiert werden. Dazu wurden je Material 3 Brandversuche durchgeführt. Als Bestrahlungsstärke wurde eine Belastung von 40 KW/m² gewählt. Dies entspricht in etwa der Strahlungsstärke im SBI- Test. Als Vergleichsprobe wurde ein Fichtenholzklotz untersucht, der die Eigenschaften eines normalentflammbaren Materiales darstellt.

Neben der Energiefreisetzung, deren Bestimmung über die Sauerstoffkalorimetrie erfolgte, sind der Entzündungszeitpunkt und die Entzündungstemperatur wichtige Kriterien zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Materialien. Der Entzündungszeitpunkt wurde durch Beobachtung ermittelt. Die zugehörige Entzündungstemperatur konnte mit diesem Versuchsaufbau nicht zuverlässig bestimmt werden, da auf Grund der sehr porösen Materialien der für die Messung wichtige innige Verbund zwischen Thermoelement und Material nicht hergestellt werden konnte, zumal die Materialien direkt nach Versuchsbeginn in sich zusammenfielen. Vorversuche zeigten, dass keine verwertbaren Ergebnisse erzielt werden konnten.

Nachdem die Versuchsapparatur kalibriert und der Cone-Strahler auf eine Wärmestrahlung von 40 KW/m² eingestellt worden ist, wurden die Probekörper unter den Cone-Strahler gestellt. Dieser Zeitpunkt wurde als Versuchbeginn definiert. Bei fast allen Proben war zu beobachten, dass mit Beginn der Wärmestrahlung die Materialien stark zusammenfielen und sich der Abstand der Probekörperoberfläche zum Cone-Strahler erheblich vergrößerte. Auf Grund des vergrößerten Abstands reduziert sich die Wärmestrahlung, die auf die Probekörperoberfläche einwirkt (vgl. Bild 73). Dies muss gegebenenfalls bei der Auswertung der Ergebnisse beachtet werden.

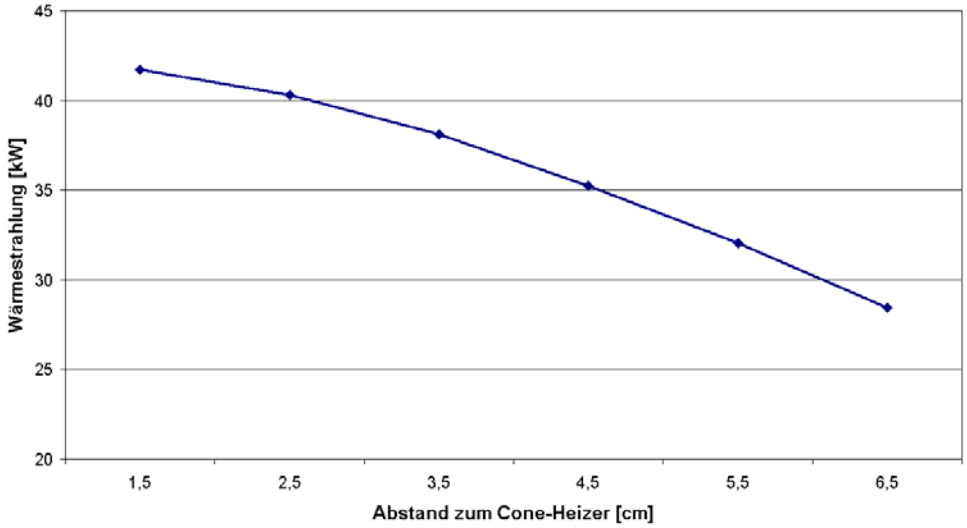


Bild 73: Höhenprofil der Strahlungsstärke des Cone-Kalorimeters

4.5.1.3 Versuchsergebnisse:

Das Versuchsprotokoll „Charakterisierung des Brandverhaltens von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen mit Hilfe des Cone-Kalorimeters“ [49] enthält die tabellarisch zusammengefassten Versuchsergebnisse der durchgeführten Cone-Kalorimeter-Versuche. Im folgenden sind zur besseren Übersicht nur die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt.

Um den Verlauf der Wärmefreisetzung (RHR) der einzelnen Produkte vergleichen zu können wurde dieser durch 5 Werte angenähert beschrieben. Die Werte sind die maximale Wärmefreisetzung mit zugehörigem Zeitpunkt, die durchschnittliche Wärmefreisetzung während der ersten 180 und 300 Sekunden nach Entzündung sowie die durchschnittliche Wärmefreisetzung nach Entzündung bis Versuchsende, und während des gesamten Versuchs. Der Heizwert ΔH der Produkte wird als durchschnittliche effektive Verbrennungswärme nach 180 s, 300 s und über die Versuchsdauer gemittelt angegeben. Zur Charakterisierung des Rauchverhaltens wird die Gesamt-Rauchproduktion nach 180 Sekunden, nach 300 Sekunden und zu Versuchsende gemessen. Statt der sonst üblichen Verwendung der Rauchfreisetzungsrate wurde hier die gesamte Rauchproduktion gewählt, da die Materialien nur eine sehr geringe Menge an Rauch produzieren.

Im folgenden werden die Ergebnisse verglichen und diskutiert.

Einen entscheidenden Einfluss auf das Brandverhalten hat der Entzündungszeitpunkt. Bild 74 zeigt den mittleren Entzündungszeitpunkt der untersuchten Produkte. Produkte, bei denen in allen 3 Versuchen keine Entzündung erfolgte haben demzufolge keinen Wert. Für Produkte, die nur in ein oder zwei Versuchen entzündeten, wurde für die Versuche, bei denen keine Entzündung auftrat, als Entzündungszeitpunkt die Versuchsdauer angegeben.

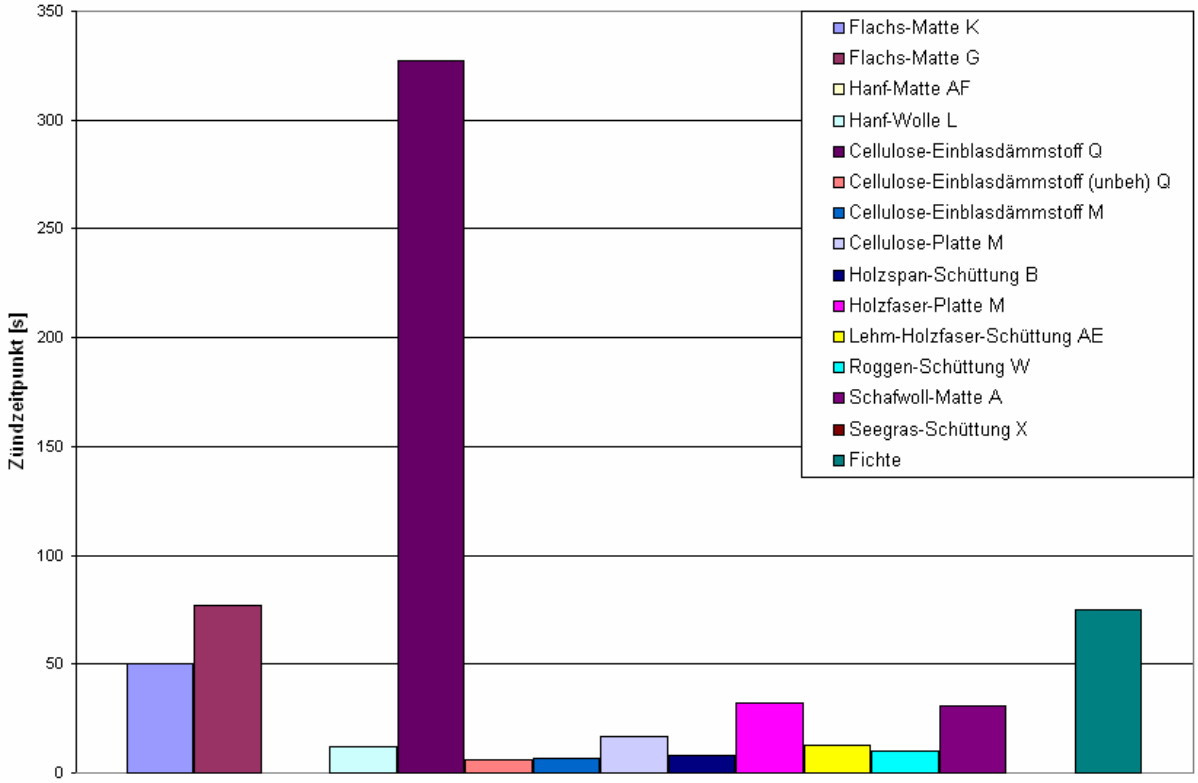


Bild 74: Zündzeitpunkt

Die Materialien Hanf-Matte AF und Seegras-Schüttung X entzündeten während einer Versuchsdauer von ca. 20 Minuten nicht. Cellulose-Einblasdämmstoff Q entzündete im Mittel nach 327 Sekunden. Flachs-Matte G entzündete ähnlich wie das Vergleichsmaterial Fichte nach ca. 75 Sekunden. Alle anderen Produkte wiesen deutlich kürzere Entzündungszeiten auf. Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q, Cellulose-Einblasdämmstoff M, Holzspan-Schüttung B und Roggen-Schüttung W entzündeten mit Zeiten unter 10 Sekunden am schnellsten. Im Vergleich zur Referenzprobe aus Fichte wiesen alle Materialien bis auf Cellulose-Einblasdämmstoff Q und Flachs-Matte G kürzere Entzündungszeiten auf. Zu beachten ist, dass neben den Materialeigenschaften die Geometrie ebenfalls einen großen Einfluss hat.

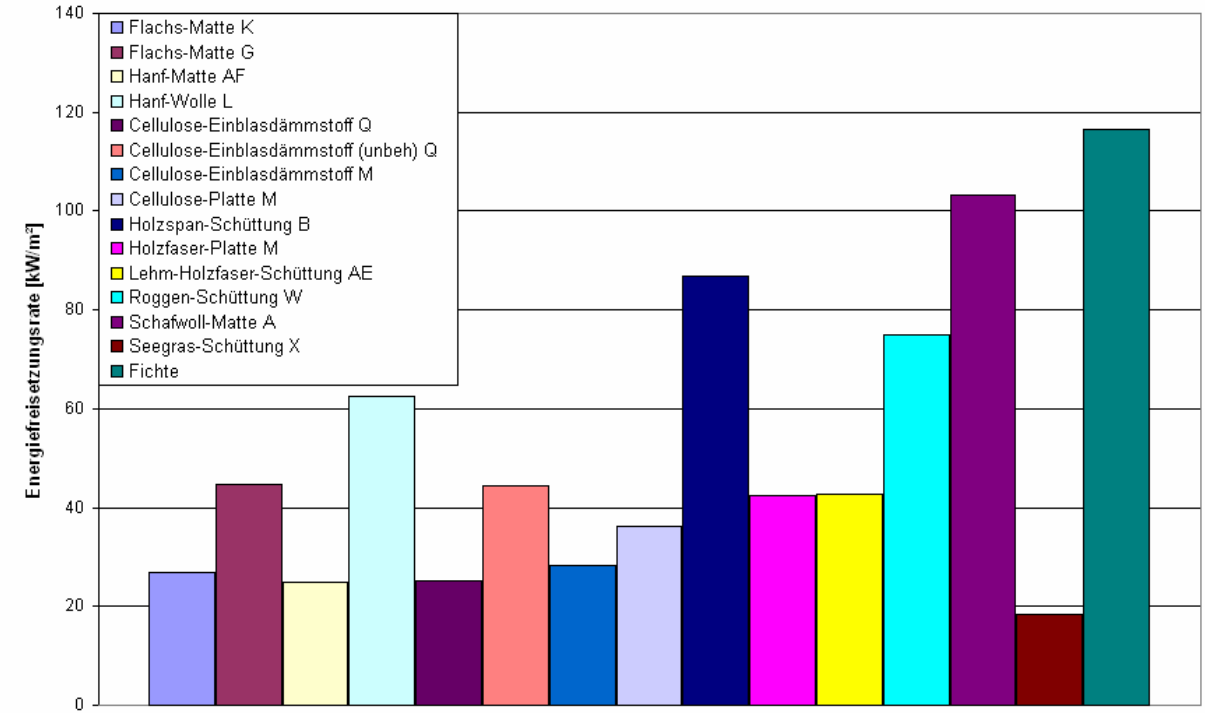


Bild 75: maximale Energiefreisetzungsrate

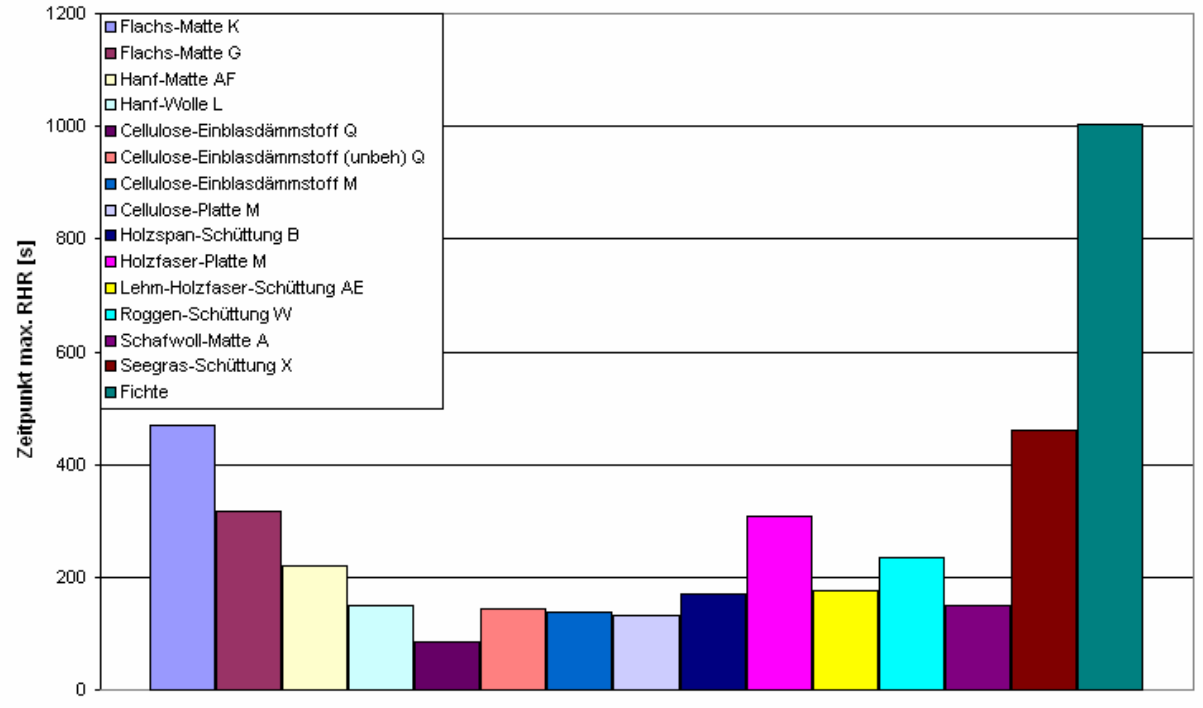


Bild 76: Zeitpunkt der maximalen Energiefreisetzung

Bild 75 zeigt die maximale Energiefreisetzung pro Flächeneinheit. Wie aus dem Diagramm ersichtlich wird, wiesen alle untersuchten Produkte eine geringere Energiefreisetzung auf als das Vergleichsmaterial Fichtenholz. Die höchsten Energiefreisetzungsraten hatten Schafwoll-Matte A (103 kW/m²) und Holzspan-Schüttung B (87 kW/m²). Die niedrigste Ener-

giefreisetzungsrate hatte Seegras-Schüttung X mit 18 kW/m². Vergleicht man allerdings die Zeitpunkte zu denen die maximalen Energiefreisetzungsraten auftrat (Bild 76), so weist das Vergleichsprodukt Fichte ein deutlich günstigeres Verhalten auf. Während bei den meisten Dämmstoffe die Maxima bereits innerhalb der ersten 200 Sekunden auftraten, erreichte die Probe aus Fichte erst nach 1000 Sekunden ihr Maximum.

Während bei der Energiefreisetzungsrate die freiwerdende Energie auf die Oberfläche bezogen wird, wird bei der Bestimmung des Heizwerts die freigesetzte Energie auf den zeitgleichen Massenverlust bezogen. Um einen Vergleich der Produkte zu ermöglichen sind die durchschnittlichen effektiven Verbrennungswärmen der einzelnen Produkte über die ersten 3 Minuten des Versuchs gemittelt worden. Die Produkte Flachs-Matte K, Hanf-Matte AF und Seegras-Schüttung X zeigten die geringsten Heizwerte auf. Mit Abstand den höchsten Heizwert hatte das Wollvliesprodukt. Die übrigen Produkte sind in etwa mit dem Referenzwert von Fichte vergleichbar. (vgl. Bild 77)

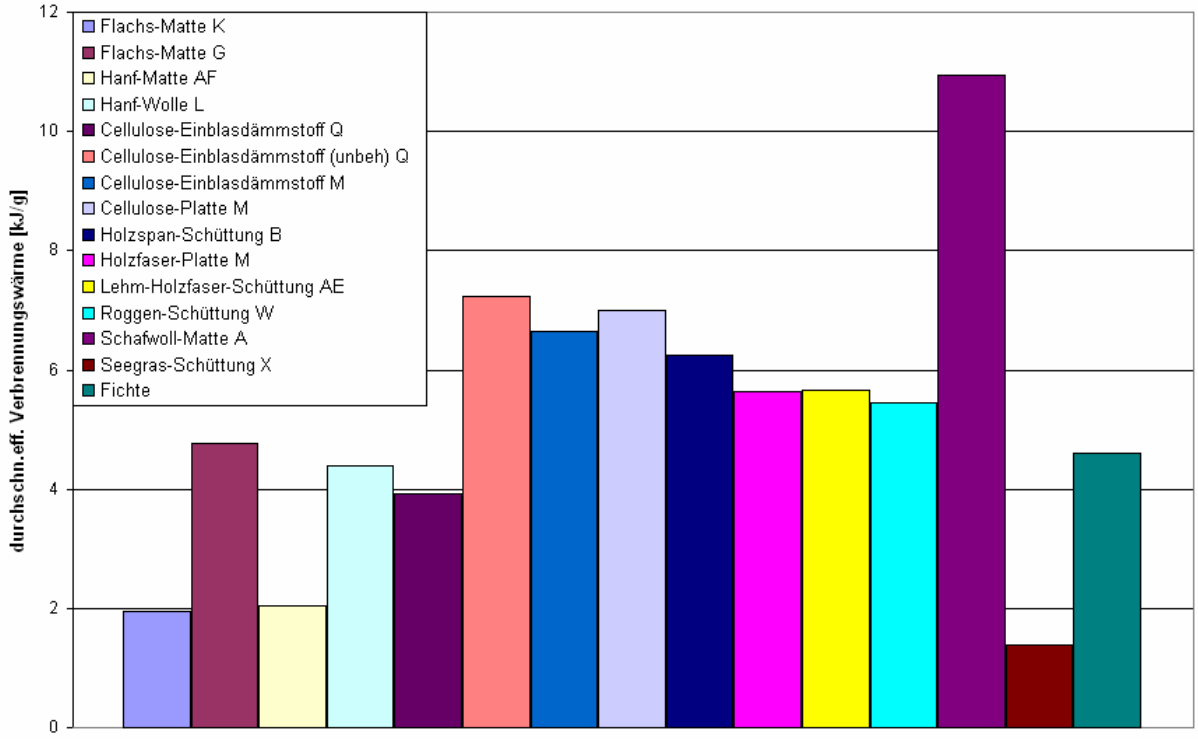


Bild 77: durchschnittliche effektive Verbrennungswärme nach 180 Sekunden

Weiter lässt sich anhand der Ergebnisse ein erster Eindruck über die Wirksamkeit von Brandschutzmitteln gewinnen. Es können zur Untersuchung der Wirksamkeit von Borsalzen die Produkte Cellulose-Einblasdämmstoff Q und Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q verglichen werden.

Einfluss von Borsalz auf das Brandverhalten

Cellulose-Einblasdämmstoff Q besteht aus vorsortiertem Zeitungspapier. Zur Verbesserung des Brandverhaltens wird dem Zeitungspapier 8% Borsalz beigemischt. Im Vergleich dazu wurde ebenfalls unbehandeltes Rohmaterial (Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q) ohne Zugabe von Borsalz

untersucht. Ein Vergleich der Entzündungszeitpunkte zeigt, dass durch die Zugabe des Borsalzes die Entzündbarkeit deutlich reduziert werden kann. Das unbehandelte Material entzündete bereits nach ca. 5 Sekunden. Durch Zugabe des Borsalzes entzündete eine von drei Probekörpern gar nicht, eine zweite erst nach 50 Sekunden und eine dritte ebenfalls nach ca. 5 Sekunden. Die positive Auswirkung des Borsalzes zeigt sich außerdem auch in der Energiefreisetzungsrate. So konnte die Energiefreisetzung gerade zu Beginn des Versuches deutlich reduziert werden. Nach 180 Sekunden Versuchsdauer betrug die durchschnittliche Energiefreisetzung bei Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q 26,49 kW/m², wohingegen mit Borsalz geschützter Cellulose-Einblasdämmstoff nur eine Energiefreisetzung von 11,41 kW/m² aufwies. Nach 300 Sekunden lagen die beiden Werte mit 29,05 für unbehandeltes Zeitungspapier und 11,15 kW/m² für Cellulose-Einblasdämmstoff Q in ähnlichen Bereichen. Durch die Zugabe von Borsalz konnte auch der Heizwert deutlich um ca. 40% reduziert werden.

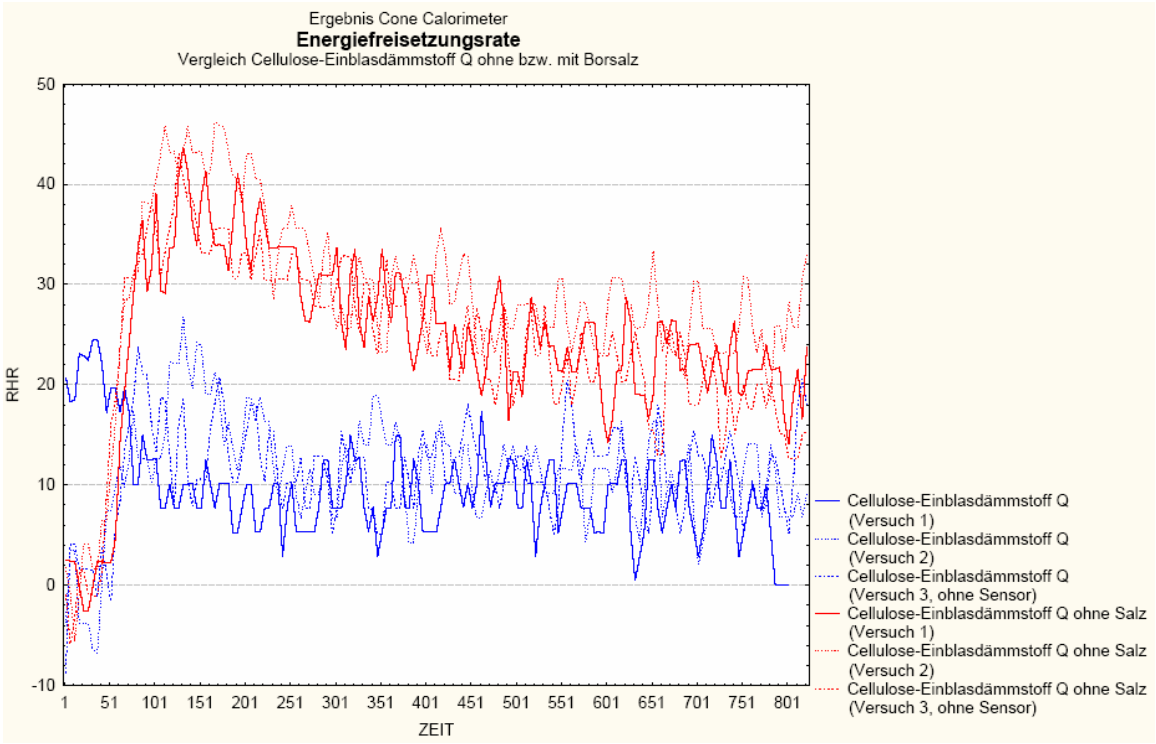


Bild 78: Energiefreisetzungsraten des Produktes Cellulose-Einblasdämmstoff Q mit und ohne Borsalz

4.5.2 Thermogravimetrische Analyse

Innerhalb dieses Berichtes wird lediglich ein grober Überblick über die thermogravimetrische Analyse, die Durchführung von Versuche und deren Auswertung geliefert. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in der Studienarbeit „Untersuchung der thermischen Zersetzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rauchgasbildung“ [50].

Bei einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) wird eine sehr kleine Probenmenge, hier ca. 10 mg, unter vorgeschriebenen Bedingungen erhitzt. Die zu analysierende Probe wird in einem Tiegel in den TGA-Ofen gestellt.

Der Tiegel hat einen Durchmesser von d = 1 cm. Die Ofentemperatur steigt über die Zeit konstant an. Die Temperatur wird mit einem Thermoelement direkt neben dem Tiegel bestimmt. Der Tiegel ist mit einer Waage verbunden, so dass jede Änderung der Probenmasse über die Zeit erfasst wird.

Bild 79 zeigt schematisch den Aufbau einer TGA. Trotz der sehr geringen Probenmasse wird durch das abgeschlossene System und die hochempfindlichen Messeinrichtungen ein hoher Genauigkeitsgrad erreicht.

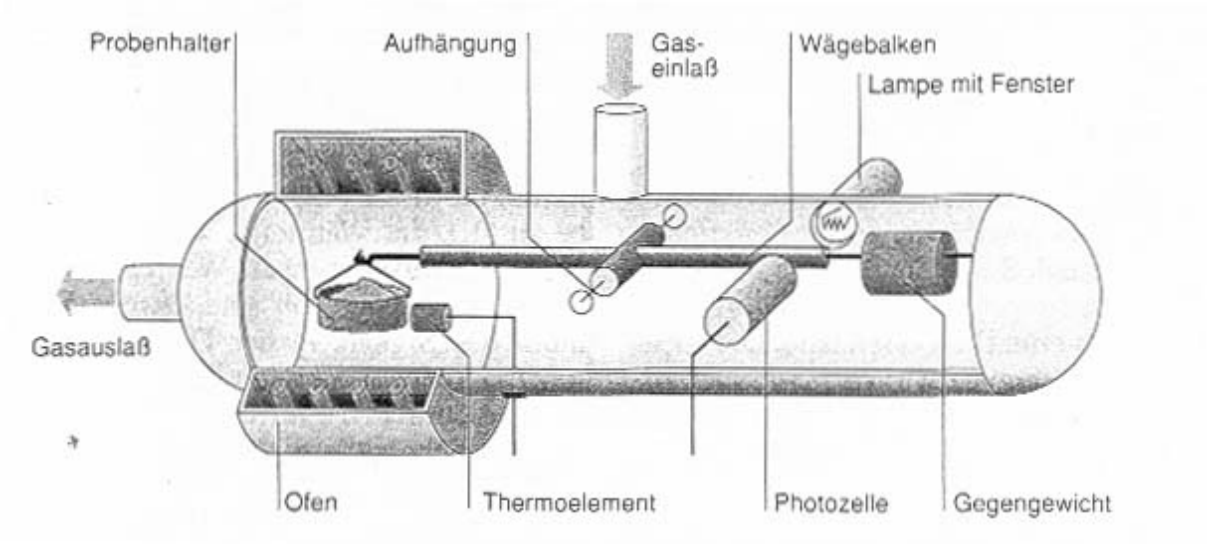


Bild 79: schematischer Aufbau einer TGA

4.5.2.1 Herstellung der Probekörper

Es wurden folgende Materialien untersucht:

- Flachs-Matte K
- Hanf-Wolle L
- Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q
- Roggen-Schüttung W
- Schafwoll-Matte A
- Holzspan-Schüttung B unbehandelt und behandelt
- Holzfaser-Platte M
- Lehm-Holzfaserschüttung AE
- Seegras-Schüttung X

Dazu wurde eine Masse von ca. 10 mg abgewogen und in den Tiegel gelegt.

4.5.2.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch startete bei Raumtemperatur, ca. 20°C. Anschließend steigt die Temperatur je Minute um 10°C an. Der Versuch wird beendet, wenn die Ofentemperatur 1000°C beträgt. Während der Versuchsdauer von ca. 100 Minuten wird der Masseverlust der Probe gemessen. Der Masseverlust entsteht durch die Bildung flüchtiger Stoffe wie Wasserdampf oder Pyrolysegase. Bild 80 zeigt den Verlauf möglicher gravimetrischer Kurven.

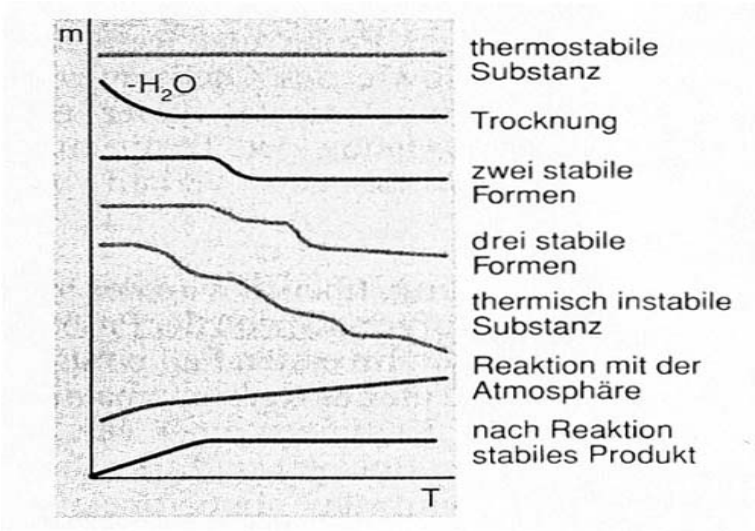


Bild 80: Klassifizierung gravimetrischer Kurven

4.5.2.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 129 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analysen. Es werden die maximale Temperatur für den massenstabilen Zustand nach der Trocknung angegeben, sowie die Temperatur, bei der der schnellste Gewichtsverlust auftrat. (vgl. [50)

Tabelle 129: Zersetzungstemperaturen der TGA

Material	Temperatur der therm. stabilen Stufe	Temperatur der max. Zersetzungsrate
	[°C]	[°C]
Schafwoll-Matte A	160	230
Roggen-Schüttung W	170	210
Flachs-Matte K	160	290
Hanf-Wolle L	-	250
Holzspan-Schüttung (unbeh) B	150	250
Holzspan-Schüttung B	150	300
Holzfaser-Platte M	120	240
Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q	160	270
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	200	280
Lehm-Holzfaserschüttung AE	150	270
Seegras-Schüttung X	-	240

Nicht bei allen Produkten konnte ein thermisch stabiler Zustand eindeutig bestimmt werden. Auch aufgrund der kleinen Masse ist diese Untersuchungsmethodik mit Fehlern behaftet. Sie liefert durch Angabe der beiden Grenzwerte jedoch einen guten Anhaltspunkt in welchem Bereich eine thermische Zersetzung der Produkte statt findet.

4.5.3 Masseverlust

In Anlehnung an DIN 52273 „Prüfung von Mineralwolle-Dämmstoffen – Bestimmung des Glühverlusts“ soll der Masseverlust der Dämmmaterialien bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Prüfung sowie Ausführungen zur Versuchsdurchführung von -auswertung erfolgt in der Studienarbeit „Untersuchung der thermischen Zersetzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rauchgasbildung“ [50]. Hier werden lediglich kurz die wesentlichen Fakten und Ergebnisse zusammengestellt. ie Proben werden zunächst bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend in einem Ofen bei Temperaturen von 150, 200, 225 und 250 °C für 30 Minuten erhitzt. Abschließend wurde der Masseverlust bestimmt.

4.5.3.1 Herstellung der Probekörper

Es wird eine Materialprobe von ca. 50 g abgewogen und auf eine Aluschale gelegt.

Bild 81: Probekörper für die Masseverlust-Untersuchungen (Schafwoll-Matte A)

4.5.3.2 Versuchsdurchführung

Die ausgewählten Materialien werden bei 105°C zum Trocknen in den Wärmeschrank gelegt. Um das Erreichen der Massenkonstanz zu gewährleisten, verbleiben die Materialien mindestens 60 Stunden im Trockenschrank. Anschließend werden die Proben in einem Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Das im Exsikkator befindliche Trocknungsmittel, Calciumchlorid, verhindert die Aufnahme von

Feuchtigkeit aus der Luft. Bevor die Materialproben für 1 Stunde bei Temperaturen von 150, 200, 225 und 250°C in den Heizofen gelangen, werden sie gewogen. Um den jeweiligen Masseverlust bestimmen zu können, werden die Proben nach der Entnahme aus dem Heizofen zur Abkühlung erneut in den Exsikkator gestellt und anschließend gewogen. Das Abkühlen vor der Wägung ist erforderlich um Fehlmessungen in Folge des Auftriebes der heißen Dämmstoffe auszuschließen. er Masseverlust wird berechnet mit

$$G = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

m_1 Masse der Probe vor der Prüfung

m_2 Masse der Probe nach der Prüfung

4.5.3.3 Versuchsergebnisse

Die Tabelle 130 zeigt die Masseverluste der untersuchten Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 130: Masseverlust der untersuchten Materialien

Material	Masseverlust bei 150 °C [%]	Masseverlust bei 200 °C [%]	Masseverlust bei 225 °C [%]	Masseverlust bei 250 °C [%]
Flachs-Matte K	0,68	2,01	**3,92**	64,72
Hanf-Wolle L	0,74	**4,49**	13,79	79,85
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	1,67	1,70	**1,82**	53,24
Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh) Q	0,54	**1,66**	71,26	81,48
Roggen-Schüttung W	**1,06**	31,60	nicht untersucht	38,37
Schafwoll-Matte A	0,44	**2,02**	20,67	26,70
Holzspan-Schüttung (unbeh) B	0,69	**3,18**	11,29	48,43
Holzspan-Schüttung B	0,40	**3,08**	7,49	57,75
Holzfaser-Platte M	**0,15**	66,99	nicht untersucht	80,31
Lehm-Holzfaserschüttung AE	0,34	**2,61**	57,48	61,94
Seegras-Schüttung X	0,92	**4,90**	11,00	20,83

Die fettgedruckten Werte der Tabelle 130 geben die Temperaturstufe wieder, bei der nur ein geringer thermischer Gewichtsverlust (< 5 %) vorliegt. Aus Prüfungen nach DIN 52273 mit Mineralwolle weiß man, dass bei einem Glühverlust größer 5 % Mineralwolle im Allgemeinen der Baustoffklasse B1 zugeordnet werden muss. In Anlehnung hierzu wurde als Bewertungskriterium ebenfalls ein Masseverlust von 5 % angenommen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Werte nicht direkt vergleichbar sind, da die Prüfung des Glühverlustes von Mineralwolle bei 500 °C durchgeführt wird.

4.5.4 Flammpunktbestimmung

Das Untersuchungsgerät wurde ursprünglich entwickelt um den Flammpunkt von Flüssigkeiten zu bestimmen. Dazu wird die Probe kontinuierlich

erwärmt und gleichzeitig der Druck im Brandraum gemessen. Oberhalb der Probe wird in regelmäßigen Abständen ein Lichtbogen gezündet, der die auftretenden Pyrolysegase entzünden soll. Zur Bestimmung der Entflammung wird ein schlagartiger Druckanstieg gemessen. Die zu dem Zeitpunkt vorhandene Ofentemperatur ist dann die Entflammungstemperatur. Anschließend wurde der Versuch abgebrochen.

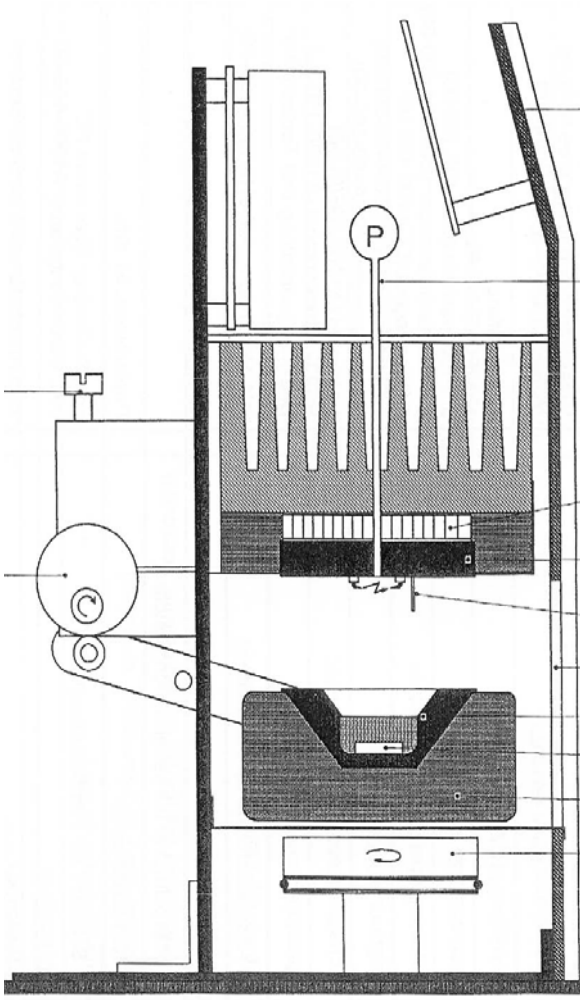


Bild 82: Querschnitt des Flammpunktgerätes

4.5.4.1 Herstellung der Probekörper

Die Größe der Probenschale betrug im Durchmesser ca. 1 cm und ließ nur eine geringe Einwaage von ca. 0,1 g zu. Vor dem Befüllen der Schale war diese sorgfältig zu reinigen. Anschließend wurde die Probe in die Probenschale gefüllt und gewogen

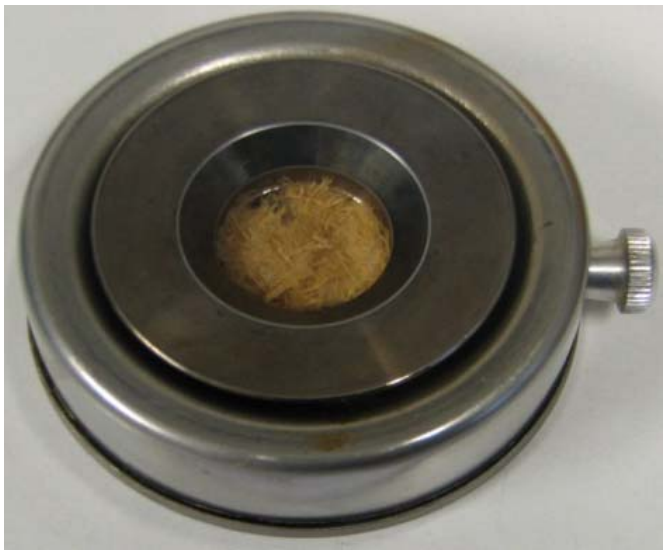


Bild 83: Probe für die Flammpunktbestimmung (Holzfaser-Platte M)

4.5.4.2 Versuchsdurchführung

Die Probenschale wird in die Heizkammer gestellt Anschließend wird die Öffnung der Heizkammer geschlossen und das Prüfprogramm gestartet. Der Ofen heizt dann bis auf die eingestellte Starttemperatur. Während des Anstieges wird alle 5°C ein Lichtbogen gezündet, um eine Übersättigung der Gase bei einer zu hoch eingestellten Anfangstemperatur zu vermeiden. Nun wird die Ofentemperatur mit der gewünschten Heizrate erhöht und bei jeder Temperaturerhöhung um 1 °C der Lichtbogen gezündet. Vor jeder Zündung wird eine kleine Luftmenge in die Messkammer eingeblasen, damit für die Entwicklung einer Flamme ausreichend Sauerstoff vorhanden ist. Wird bei einer Zündung die vorgegebene Druckschwelle von 20 kPa überschritten ist der Flammpunkt erreicht.

4.5.4.3 Versuchsergebnisse

Eine Bestimmung des Flammpunktes war nicht bei allen Materialien möglich. Das Gerät detektierte nur bei drei von elf Materialien einen Flammpunkt. Die Anwendung der für Flüssigkeiten entwickelten Prüfmethode auf feste, brennbare Dämmstoffe hat sich unter den aufgeführten Versuchsbedingungen als ungeeignet erwiesen. Daher wird auf die Ergebnisse nicht näher eingegangen. Detailliertere Informationen zur Versuchsdurchführung sind der Studienarbeit „Untersuchung der thermischen Zersetzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rauchgasbildung“ [50] zu entnehmen.

4.6 Durchführung europäischer Klassifizierungsversuche

4.6.1 Prüfung nach DIN EN ISO 11925-2 (Kleinbrennertest)

Zur Beurteilung des Brandverhaltens wurden als Ergänzung zu den geplanten SBI-Versuchen Untersuchungen im Brennkasten nach DIN EN 11925-2 [43] durchgeführt. Die Norm beschreibt ein Prüfverfahren zur Ermittlung der Entzündbarkeit von Bauprodukten, die in vertikaler Anordnung mit Hilfe einer direkt einwirkenden kleinen Flamme, vergleichbar mit einer Kerzenflamme, ohne zusätzliche Wärmestrahlung geprüft werden. Die plattenförmigen Baustoffe werden dazu in einen Metallrahmen eingespannt. Zur Prüfung von losen Materialien, sogenannten Schüttgütern oder Füllstoffen, wurden diese in einen Drahtkorb gefüllt. Dabei handelt es sich um eine nationale Verabredung der deutschen Materialprüfanstalten zur praktischen Durchführung der Prüfungen nach DIN 4102-1 [39]. Für die Prüfungen nach DIN EN 11925 Teil 2 existiert eine derartige Verabredung noch nicht.

Je nach Euroklasseklasse beträgt die Beflammungszeit 15 Sekunden für Baustoffe der Euroklasse E oder 30 Sekunden für die Euroklassen B bis D. Die Beflammung kann entweder als Flächen– oder als Kantenbeflammung erfolgen. Bei der Flächenbeflammung werden die Proben 40 mm oberhalb des unteren Randes auf der Mittellinie beflammt. Bei der Kantenbeflammung von ebenen ein- oder mehrschichtigen Bauprodukten mit einer Dicke über 3 mm müssen die Proben an der unteren Kante in halber Probenbreite 1,5 mm hinter der Vorderkante beflammt werden. Zur Beurteilung wird die Flammenhöhe gemessen, die bei erfolgreicher Prüfung einen Wert von 150 mm oberhalb des Beflammungspunktes nicht erreichen darf. Die Rauchentwicklung wird ebenfalls beobachtet.

4.6.1.1 Herstellung der Probekörper

Es sind acht Produkte hinsichtlich ihres Entzündungsverhaltens bei Beanspruchung durch eine kleine Flamme (entspricht etwa der Größe einer Kerzenflamme) untersucht worden. Die plattenförmigen Dämmstoffe hatten die Abmessungen 250 x 90 x 60 mm³. Die losen Dämmstoffe wurden in einen Drahtkorb mit Innenmaßen von 180 x 90 x 40 mm³ gefüllt.

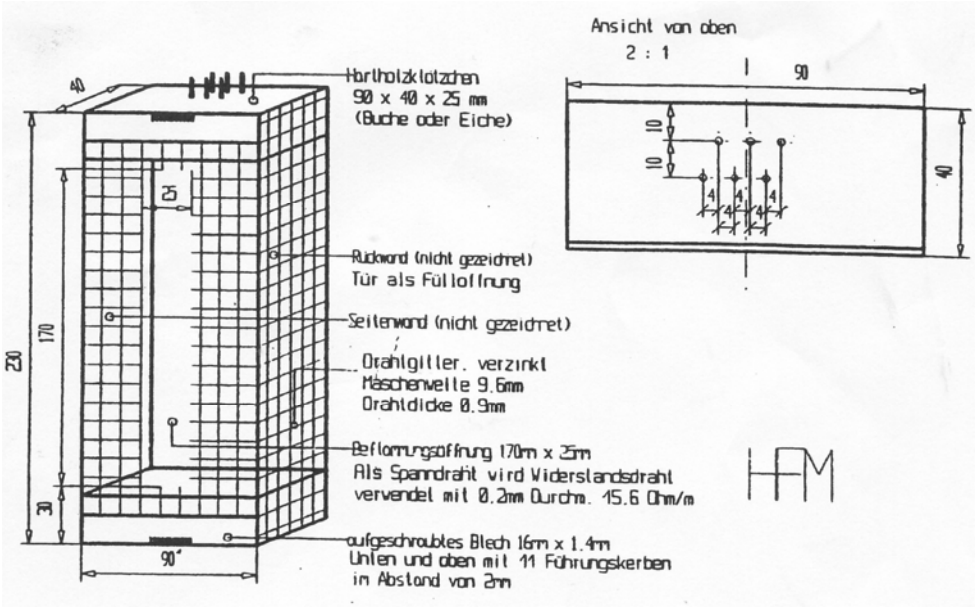


Bild 84: Drahtkorb aus der nationalen Verabredung der Prüfinstitute

4.6.1.2 Versuchsdurchführung

Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gibt Tabelle 131. Es trat erwartungsgemäß bei allen Materialien eine schnelle Entzündung auf. Eine Entzündung liegt vor, wenn die auftretende Flamme größer als die vorhandene Brennerflamme ist und für eine Dauer von mehr als 3 Sekunden anhält. Ein brennendes Abfallen und folglich eine Entzündung des darunter liegenden Filterpapiers konnte hingegen bei keinem der Versuche beobachtet werden. Die Rauchentwicklung konnte für fast alle Produkte als gering eingestuft werden.

4.6.1.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 131 dargestellt. Bis auf die Schafwoll-Matte A konnten alle Produkte mindestens die Anforderungen der Euroklasse E erfüllen. Bei der Schafwoll-Matte A erreichten die Flammen bei einem Versuch die Messmarke von 150 mm, so dass auf Grundlage dieses Versuches das Produkt in die Euroklasse F einzustufen wäre. Die Flammen erloschen nach Wegnahme der Zündflamme selbstständig. Es ist jedoch zu beachten, dass die Versuche einer gewissen Streuung unterliegen. Bild 85a zeigt den Probekörper nach dem Brandversuch. Die 3 weiteren Brandversuche mit diesem Produkt verliefen positiv. Daraus ist zu erkennen, das dieses Produkt als so genannter „Grenzgänger“ einzustufen ist.

Bei dem Produkt Holzspan-Schüttung B zeigte sich ebenfalls eine große Flammenhöhe. Jedoch erreichten sie mit etwa 130-140 mm nicht die Messmarke von 150 mm. Die Nachglimmzeit von 85 Sekunden ab Versuchsbeginn bei 15-Sekunden-Beflammung und 141 Sekunden bei 30-Sekunden-Beflammung war jedoch vergleichsweise hoch und deutet auf eine starke Neigung zum Glimmen.

Tabelle 131: Ergebnisse der Brennkastenprüfung nach DIN EN 11925-2

Versuchsnr. [-/-]	Art der Beflammung [-/-]	Material [-/-]	Dichte [kg/m³]	Dauer d. Beflammung [s]	Flammen-höhe [cm]	Selbsterlöschen der Flammen [s]	Ende des Glimmens [s]	Rauch-entwicklung [-/-]	Euroklasse* [-/-]
060606_01	Fläche	Hanf-Matte AF	33,41	15	7	15	25	sehr gering	E
060606_02	Fläche	Hanf-Matte AF	33,48	15	7	15	24	sehr gering	E
060606_03	Kante	Hanf-Matte AF	32,07	15	5	15	70	sehr gering	E
060606_04	Kante	Hanf-Matte AF	34,22	30	6	30	50	sehr gering	D mögl.
060606_05	Fläche	Hanf-Matte AF	34,00	30	10	30	45	sehr gering	D mögl.
060606_06	Fläche	Cell.-Einblasd. Q	73,92	15	5	15	18	sehr gering	E
060606_07	Fläche	Cell.-Einblasd. Q	72,53	30	6	30	32	sehr gering	D mögl.
060606_08	Fläche	Seegras-Schüttung X	71,30	15	3	15	15	sehr gering	E
060606_09	Fläche	Seegras-Schüttung X	74,85	30	2	30	30	sehr gering	D mögl.
060606_10	Fläche	Cell.-Einblasd. (o. Bor)	47,53	15	11	15	> 300	gering	E
060606_11	Fläche	Cell.-Einblasd. (o. Bor)	45,99	30	10	110	> 300	gering	D mögl.
060606_12	Fläche	Holzspan-Schüttung B	46,30	15	13	15	85	sehr gering	E
060606_13	Fläche	Holzspan-Schüttung B	47,84	30	13-14	31	141	sehr gering	D mögl.
060606_14	Fläche	Lehm-Holzf.-schütt. AE	106,94	15	4	15	46	sehr gering	E
060606_15	Fläche	Lehm-Holzf.-schütt. AE	111,27	30	4	30	58	sehr gering	D mögl.
060606_16	Fläche	Hanf-Wolle L	50,31	15	5	15	> 300	gering	E
060606_17	Fläche	Hanf-Wolle L	47,38	30	5-6	30	> 300	gering	D mögl.
060606_18	Fläche	Schafwoll-Matte A	34,74	30	16	20	20	sehr gering	- / -
060606_19	Fläche	Schafwoll-Matte A	34,81	15	14-15	15	15	sehr gering	E
060606_20	Kante	Schafwoll-Matte A	34,96	15	11-12	15	15	sehr gering	E
060606_21	Kante	Schafwoll-Matte A	39,85	30	15-16	12	12	sehr gering	- / -
070425_01	Fläche	Cellulose-Platte M	58,6	15	7	15	18	sehr gering	E
070425_02	Fläche	Cellulose-Platte M	61,3	30	6	30	34	sehr gering	D mögl.
070425_03	Fläche	Flachs-Matte G	35,4	15	8	15	18	sehr gering	E
070425_04	Fläche	Flachs-Matte G	34,9	30	7	30	39	sehr gering	D mögl.
070425_05	Fläche	Cell.-Einblasd. M	41,5	15	7	15	18	sehr gering	E
070425_06	Fläche	Cell.-Einblasd. M	39,9	30	6	30	36	sehr gering	D mögl.
070425_07	Fläche	Holzfaser-Platte M	48,2	15	8	15	17	sehr gering	E
070425_08	Fläche	Holzfaser-Platte M	49,6	30	7	30	31	sehr gering	D mögl.
070425_09	Fläche	Flachs-Matte K	32,2	15	8	15	21	sehr gering	E
070425_10	Fläche	Flachs-Matte K	33,5	30	6	33	38	sehr gering	D mögl.

a) b)

Bild 85: Schafwoll-Matte A bzw. Hanf-Wolle L nach 15 Sekunden Beflammung im Brennkasten

Die Flammenhöhen der restlichen Materialien, mit Ausnahme der Seegras-Schüttung B, lagen zwischen 4 cm und 7 cm. Bei der Seegras-Schüttung B war kaum eine Entzündung festzustellen. Die Flammenhöhe betrug ca. 2 – 3 cm. Mit Ende der Beflammung trat auch das Ende des Nachglimmens ein.

Neben dem Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh.) Q, der Hanf-Wolle L und der Holzspan-Schüttung B konnte auch bei der Lehm-Holzfaserschüttung AE eine längere Nachglimmzeit festgestellt werden. Bei der 15-sekündigen Beflammung setzte das Ende des Nachglimmens nach 46 Sekunden, bei der 30-sekündigen Beflammung nach 58 Sekunden ein.

Die Versuche mit dem Dämmstoff Hanf-Matte AF ergaben deutliche Unterschiede zwischen der Flächen- und der Kantenbeflammung. Die Versuche mit Kantenbeflammung wiesen deutlich längere Nachglimmzeiten auf. Bei der 15-sekündigen Kantenbeflammung endete das Nachglimmen nach ca. 70 Sekunden. Die Probe, die 15 Sekunden lang flächenbeflammt wurde, glimmte hingegen nur 25 Sekunden nach.

Bei 30-sekündiger Kantenbeflammung endete die Nachglimmzeit nach 50 Sekunden, bei der Flächenbeflammung nach 45 Sekunden.

Bei dem nicht mit Borsalz behandelten Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh.) Q war eine Flammenhöhe von etwa 100 – 110 mm zu beobachten. Bei dem mit Borsalz behandelten Cellulose-Einblasdämmstoff Q ist die Entzündbarkeit wesentlich geringer. Die Versuche zeigten eine maximale Flammenhöhe von 50 – 60 mm. Außerdem war eine verstärkte Rauchentwicklung bei dem Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh.) Q im Vergleich zum Cellulose-Einblasdämmstoff Q zu beobachten. Daneben verdeutlichen auch das Selbsterlöschen der Flammen und die Nachglimmzeiten den positiven Einfluss des Flammschutzmittels Borsalz auf das Brandverhalten. Die Flammen erlöschen bei der 30-sekündiger Beflammung beim Cellulose-Einblasdämmstoff (unbeh.) Q erst nach 110 Sekunden selbstständig, während die Flammen bei dem Versuch mit Cellulose-Einblasdämmstoff Q mit Ende der Beflammung erloschen.

Ein Ende des Nachglimmens setzte bei dem Cellulose-Einblasdämmstoff (ohne Bor) wie auch bei der Hanf-Wolle L innerhalb von 5 Minuten Warte-

zeit nicht ein, wie Bild 85b zeigt. Der Cellulose-Einblasdämmstoff Q hatte hingegen mit 18 Sekunden bei 15-sekündiger Beflammung und 32 Sekunden bei der 30-sekündiger Beflammung geringe Nachglimmzeiten.

4.6.2 Prüfung nach DIN EN 13823 (Single-Burning-Item)

Im Zuge dieses Abschlussberichts wird lediglich ein grober Überblick über die Prüfung nach DIN EN 13823 [42], die Durchführung von Versuche und deren Auswertung geliefert. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in der Studienarbeit „Optimierung des Flammschutzmittelgehaltes von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich der europäischen Baustoffklasseneinteilung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte“ [51]. Es handelt sich hierbei um einen mittelformatigen Brandversuch. Die Prüfung stellt die thermische Beanspruchung des Baustoffes durch einen einzelnen brennenden Gegenstand in einer Raumecke dar, die in etwa dem Brand eines Papierkorbes entsprechen soll. Die Abkürzung SBI steht für „Single Burning Item“, was mit „einzelner brennender Gegenstand“ zu übersetzen ist. Die SBI-Prüfung ist für Baustoffe der Euroklassen D, C, B und gegebenenfalls A2 erforderlich. Baustoffe, die die Anforderungen der Euroklasse D nicht erfüllen, werden bei erfolgreicher Prüfung im Kleinbrennertest der Euroklasse E zugeordnet.

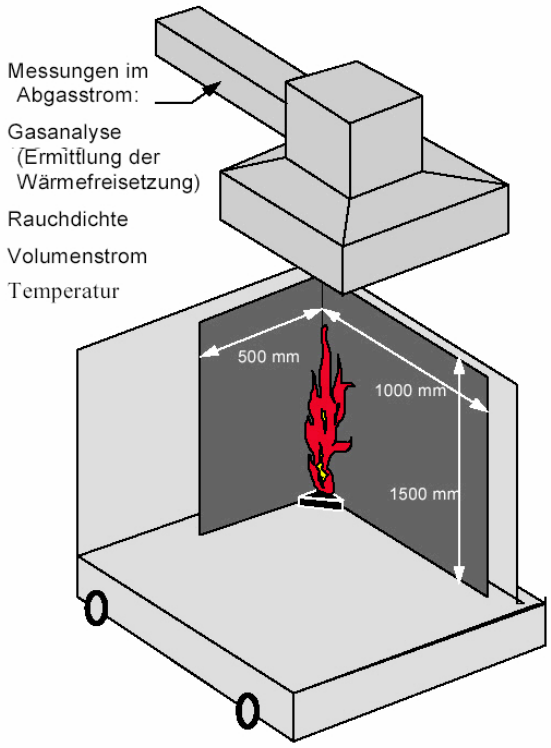


Bild 86: schematischer Versuchsaufbau der SBI-Prüfung

Der Probekörper besteht aus 2 rechtwinklig angeordneten Flügeln. In der entstehenden Ecke befindet sich der Sandbettbrenner, der mit einer Wärmefreisetzungsrate von 30,7 ± 2 kW betrieben wird.

4.6.2.1 Herstellung der Probekörper

Der Probekörper für eine SBI-Prüfung besteht aus einem breiten (1000 ± 5 mm) und einem schmalen Probenflügel (495 ± 5 mm) mit einer Höhe von jeweils 1500 ± 5 mm. Die maximale Dicke beträgt für beide Flügel 200 mm. Dickere Proben müssen auf der flammenabgewandten Seite auf 200 mm reduziert werden, gelten aber als stellvertretend für Dickere.

4.6.2.2 Versuchsdurchführung

Der Startzeitpunkt des Versuches wird mit t = 0 s definiert. Nach t = 120 ± 5 s wird der Nebenbrenner gezündet. Innerhalb des Zeitfensters von t = 210 s und t = 270 s wird die „Grundlinie“ der Wärmefreisetzungsrate ermittelt. Diese ist die Energiefreisetzungsrate des Brenners und muss später von der Gesamtenergiefreisetzungsrate abgezogen werden, um die Freisetzung, die von der Probe ausgeht zu erhalten.

Zum Zeitpunkt t = 300 ± 5 s wird die Gasversorgung vom Nebenbrenner auf den Hauptbrenner umgeschaltet. Das Brandverhalten der nun direkt beflammten Probe wird für die nächsten 1260 Sekunden aufgezeichnet und beobachtet. Eine Beurteilung des Brandverhaltens erfolgt über 1200 Sekunden, sodass in der Prüfung eine Nachlaufzeit von 60 Sekunden vorgesehen ist.

Die Prüfung endet zum Zeitpunkt t = 1560 s mit dem Abschalten des Hauptbrenners und der automatischen Datenerfassung.

Neben den zahlreichen automatisch erfassten Prüfparametern sind weitere Parameter durch den anwesenden Prüfer visuell festzustellen und aufzuzeichnen. Hierzu zählen

- Brennendes Abfallen oder Abtropfen
- Seitliche Flammenausbreitung
- Spaltbildung in der Ecke der Probenflügel
- Verformungen oder Auseinanderbrechen der Probenflügel
- Nicht über das Abzugssystem abgeführter Rauch
- Gründe bei einem etwaigen Versuchsabbruch

Während der Prüfungsdurchführung kann es zu Situationen kommen, in denen die Prüfung abgebrochen werden muss. Dies ist der Fall,

- wenn eine Wärmefreisetzungsrate von 350 kW zu einem Zeitpunkt oder eine Wärmefreisetzungsrate von 280 kW in einem Mittel über 30 Sekunden erreicht oder überschritten wird,
- wenn die Temperatur eines Sensors in der Messstrecke zu einem Zeitpunkt 400°C oder in einem Mittel über 30 Sekunden 300°C überschreitet,
- wenn herabfallende Probenteile die Flammen des Sandbettbrenners ersticken oder erheblich stören. Von einer erheblichen

Störung muss ausgegangen werden, wenn mindestens die Hälfte der Brennerfläche bedeckt ist.

Musste eine Prüfung aus den oben genannten Gründen abgebrochen werden, so sind die Ergebnisse für eine Klassifizierung ungültig.

4.6.2.3 Versuchsergebnisse

Für eine Klassifizierung der Baustoffe sind hauptsächlich der FIGRA-Wert (Fire Growth Rate), der SMOGRA-Wert (Smoke Growth Rate) und die THR600s (Total Heat Release) von Bedeutung.

Der FIGRA-Wert stellt den Wachstumswert des Feuers dar und hat die Einheit [W/s].

Die THR600s beschreibt die gesamte Energiemenge, die während der ersten 600 Sekunden der Beflammung freigesetzt wird und wird in Megajoule [MJ] angegeben.

Der SMOGRA-Wert beschreibt das Rauchwachstum und wird in [m²/s²] angegeben.

Zur Bestimmung der freigesetzten Energie wird, wie beim Cone-Kalorimeter, die Methode der Sauerstoffkalorimetrie genutzt. Die Energiefreisetzungsrate der Probe berechnet sich aus der gesamten Energiefreisetzungsrate abzüglich der des Brenners, dessen Freisetzungsrate am Anfang des Versuches (210 s < t < 270 s) bestimmt wurde.

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden insgesamt 4 Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bezüglich ihres Brandverhaltens im SBI untersucht. Dies waren die Produkte Cellulose-Platte M, Flachs-Matte G, Seegras-Schüttung X und Holzspan-Schüttung B. Bild 87 zeigt die Wärmefreisetzungsrate der untersuchten Produkte aufgetragen über die Zeit.

Die höchste Wärmefreisetzung weist die Holzspan-Schüttung B mit ca. 125 kW/m² auf. Die Wärmefreisetzungsraten der anderen Produkte liegen unter 30 kW/m² und sind damit deutlich geringer. Man sieht, dass sowohl bei der Cellulose-Platte M als auch bei der Flachs-Matte G die Wärmefreisetzung mit fortschreitendem Versuch leicht ansteigt. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass bezogen auf die Fläche mehr Material entzündet wurde. Bei der Seegras-Schüttung X hingegen fällt die Wärmefreisetzung mit zunehmender Versuchsdauer wieder ab. Hier fand während des Versuches kaum eine Entzündung des Materials statt. Stattdessen verglühte das Material, welches direkt von den Flammen beaufschlagt wurde. Eine seitliche Flammenausbreitung war nicht zu beobachten. Die vergleichsweise hohe Wärmefreisetzung der Holzspan-Schüttung B ist wahrscheinlich unter anderem auf die große Oberfläche und die gute Belüftung zwischen den Spänen zurückzuführen.

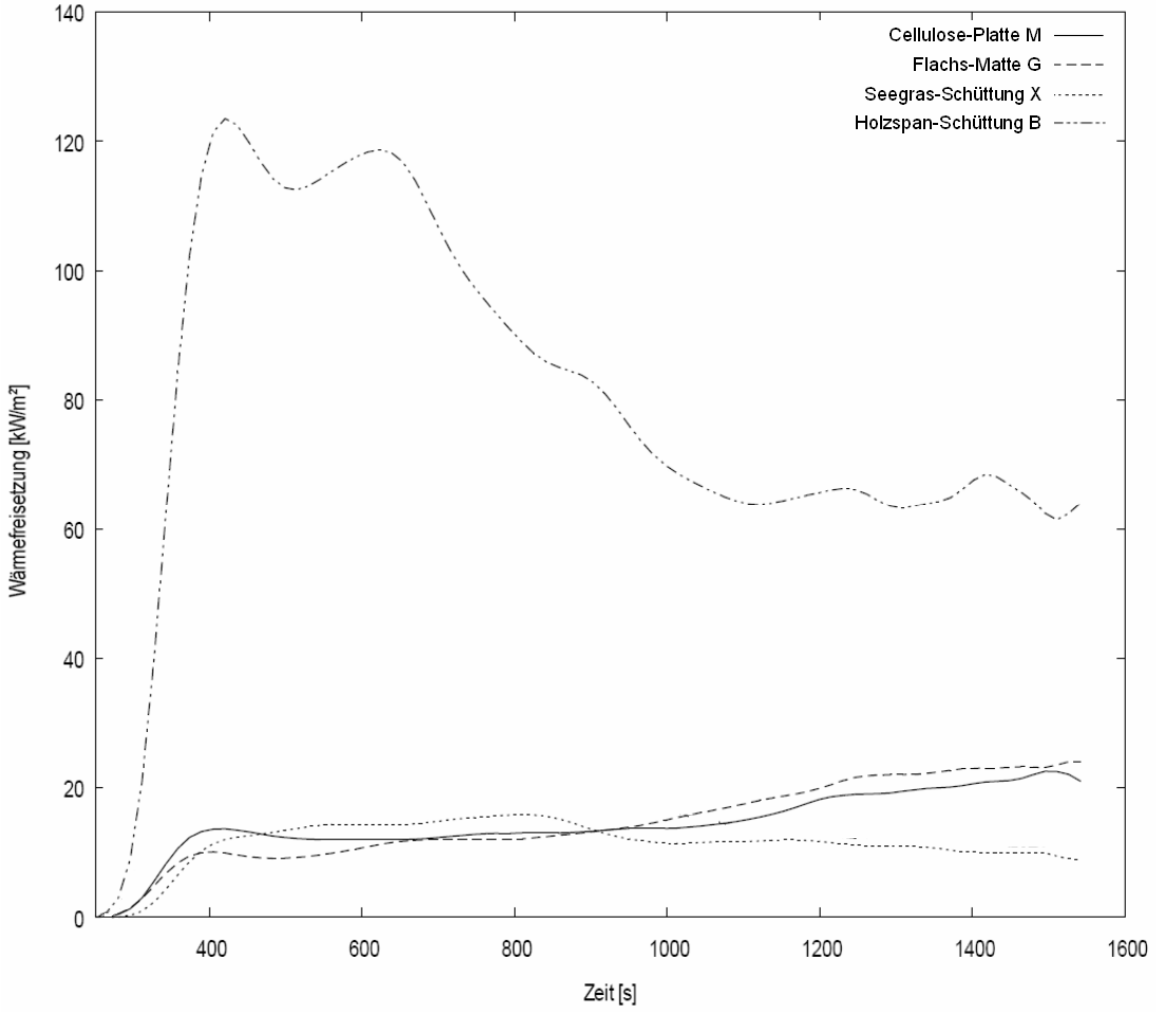


Bild 87: Wärmefreisetzungsrate

Folgende Tabelle zeigt die aus den Versuchen resultierenden Klassifizierungen nach europäischer Norm (EN 13501). Bei keinem Versuch erreichte das Feuer die linke Seite des kleinen Probenflügels. Brennendes Abfallen oder Abtropfen war nicht zu beobachten.

Tabelle 132: Klassifizierung der untersuchten Materialien nach DIN EN 13501-1

	FIGRA [W/s]	THR_{600s} [MJ]	SMOGRA [m²/s²]	TSP_{600s} [m²]	Klasse
Cellulose-Platte M	220,8	7,5	18,26	147,3	C,s2,d0
Flachs-Matte G	158,4	6,6	43,1	292,0	C,s3,d0
Seegras-Schüttung X	135,7	8,1	33,5	231,1	C,s3,d0
Holzspan-Schüttung B	1689,7	61,0	8,1	106,4	E,s1,d0

4.6.3 Vorhersage von SBI-Versuchen auf Basis des Cone-Kalorimeters

Mit den neuen Euroklassen wurde der SBI-Test als europaweites Prüfverfahren für Baustoffe eingeführt. Dieser in EN 13823 beschriebene Test gilt als mittelformatiges Prüfverfahren und ist aufgrund seiner Abmessungen vergleichsweise kostenintensiv. Das Cone-Kalorimeter hingegen als kleinformatige Untersuchungsmethode bietet eine kostengünstige Möglichkeit, Kennwerte über das Brandverhalten unterschiedlicher Materialien zu gewinnen. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit bei der Entwicklung von Dämmstoffen auf Cone-Kalorimeter-Versuchen basierende Daten zur Vorhersage des Dämmstoffverhaltens in SBI-Versuchen genutzt werden können. Einen Ansatz hierfür liefern Messerschmidt, Van Hees und Wickström in dem Bericht “Prediction of SBI test results by means of Cone Calorimeter Test results“ [52].

Der Studienarbeit „Optimierung des Flammschutzmittelgehaltes von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich der europäischen Baustoffklasseneinteilung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte“ [51] können detaillierte Beschreibungen der Prüfung sowie Ausführungen zur Versuchsdurchführung von -auswertung entnommen werden. Im Zuge dieses Berichts werden lediglich die wesentlichen Fakten und eine Zusammenstellung der Ergebnisse aufgeführt.

4.6.3.1 Beschreibung des Modells

Dem Vorhersagemodell liegen im Wesentlichen die drei Annahmen zugrunde, dass

- das Feuerwachstum von der Energiefreisetzung unabhängig ist,
- das Feuerwachstum proportional zur Entzündbarkeit ist und
- die flächenbezogenen Energiefreisetzungen bei SBI- und Cone-Versuchen gleich sind.

Die Möglichkeiten des Feuerwachstums während des SBI-Tests werden in Bild 88 beschrieben. Man nimmt an, dass sich das Feuer zunächst entlang Pfad I ausbreitet. Je nach berechneter Flammenhöhe wird der Brand dann entweder entlang Pfad II oder Pfad III verlaufen. Die Pfade beschreiben das weitere Feuerwachstum bis zu einem empirisch ermittelten Grenzwert (A_{max}).

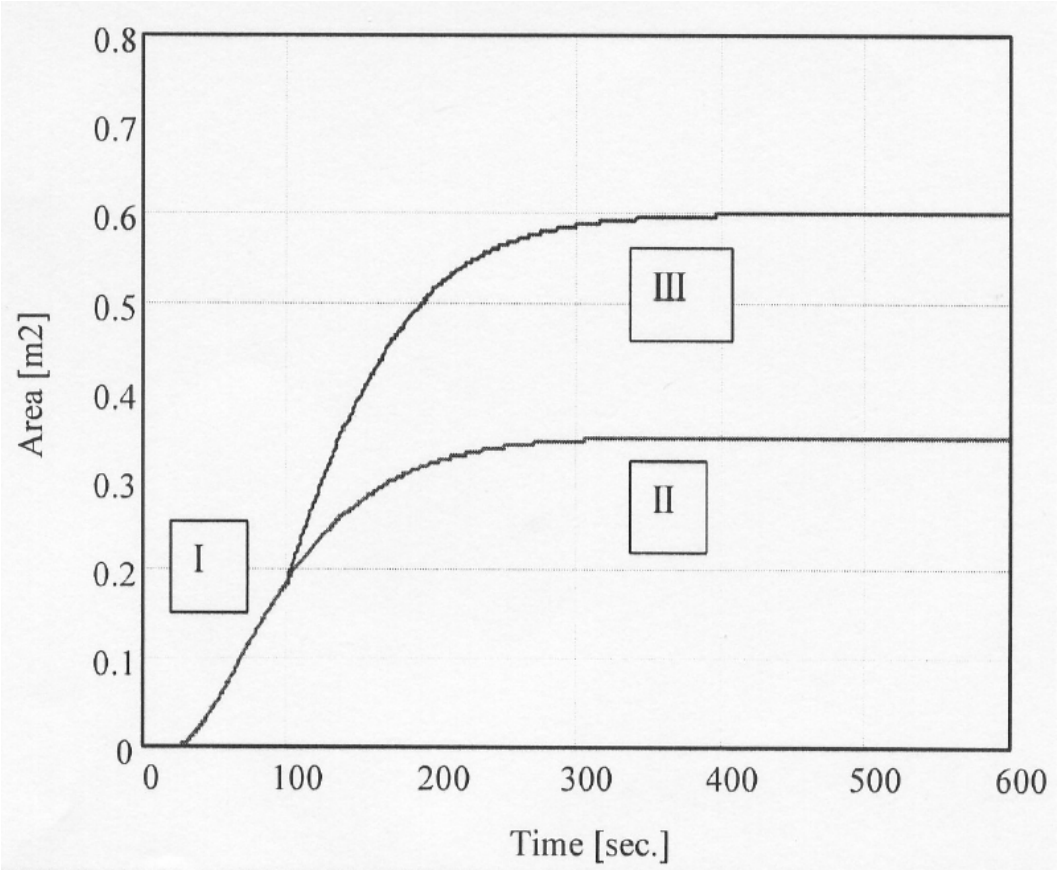


Bild 88: angenommene Feuerausbreitung

Numerisch lässt sich das Feuerwachstum mit folgender Funktion beschreiben.

$$A(t) = A_{\max} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{t - \frac{t_{ign}}{2}}{t_{ign}} \right) \cdot \exp\left(- \frac{t - \frac{t_{ign}}{2}}{t_{ign}} \right) \right]$$

Hierbei stellt t_{ign} den Zündzeitpunkt des Cone-Kalorimeter-Versuchs und A_{max} den empirischen Grenzwert der Fläche des Feuers dar. Dieser beträgt entweder 0,35 m² (Pfad II) oder 0,6 m² (Pfad III). Die Funktion des Feuerwachstums und die angenommenen maximalen Flächen sind empirisch, auf der Basis von Versuchsergebnissen des SP und des Danish Institute of Fire Technology (DIFT) gewählt [52][53].

Mit der Flächenfunktion und der Funktion der Energiefreisetzung des Cone-Kalorimeters kann man nun die gesamte Energiefreisetzung bestimmen. Diese ergibt sich dann zu

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{product}} + \dot{Q}_{\text{burner}}$$

wobei die Freisetzungsrate des Brenners bekannt ist. Die Energiefreisetzungsrate des Testkörpers berechnet sich nach dem Integral von Duhamel.

$$\dot{Q}_{product} = \int_0^t \dot{A}(\tau) \cdot \dot{q}''_{bs} \cdot (t - \tau) d\tau$$

mit $\dot{A}(\tau)$ zeitliche Ableitung der Flächenfunktion
und $\dot{q}''_{bs}$ Energiefreisetzungsrate des Cone – Kalorimeters
und τ Dummy Variable

Dieses Integral ist nur geschlossen lösbar, wenn die Energiefreisetzungsrate des Cone-Kalorimeters als analytische Funktion vorliegt. Da dies in der Praxis nicht der Fall ist, muss das Integral angenähert werden. Einen einfachen numerischen Ansatz hierfür stellt folgende Funktion dar:

$$\dot{Q}_{product} = \sum_{i=1}^{N} \Delta A_i \cdot \dot{q}''^{N-i}_{bs}$$

mit $\Delta\dot{A}_i$ Brandfläche zum Zeitschritt i
und $\dot{q}''^{N-1}$ Wärmefreisetzungsrate des Cones zum Zeitschritt i

Aus der ermittelten Energiefreisetzung kann auf die Flammenhöhe des SBI-Versuches geschlossen werden. Diese berechnet sich wie folgt:

$$\frac{H}{D} = 3 \cdot \dot{Q}^{2/3} \quad \text{mit} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_{total} \cdot \left(D^{5/3} \cdot 1110 \right)$$

mit H Flammenhöhe
und D Durchmesser des SBI – Brenners (150mm)

Für die Berechnung der Flammenhöhe ist die Funktion der Energiefreisetzung erforderlich, die allerdings wiederum von der Flammenhöhe abhängig ist. Eine Rechnung kann daher nur iterativ erfolgen. Zunächst wird das Feuerwachstum nach Pfad II (0,35 m² Feuerfläche) angesetzt und daraus die Energiefreisetzung berechnet. Aus dieser wird nun die Flammenhöhe berechnet und erneut der Pfad ausgewählt.

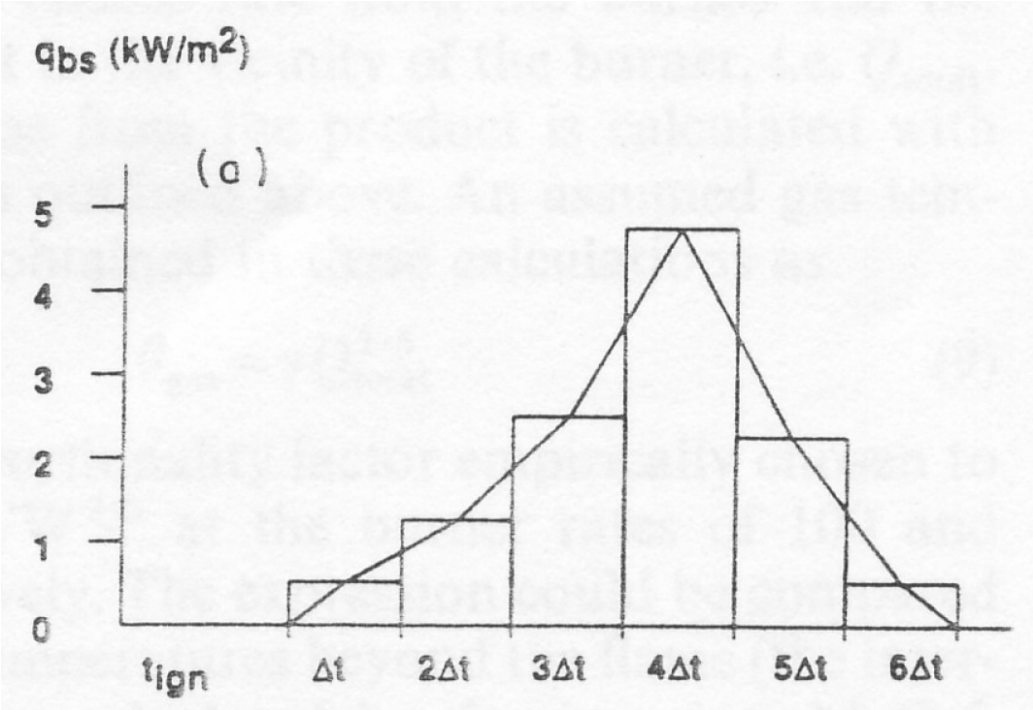


Bild 89: Schematisch Darstellung der Wärmefreisetzung des Cone-Kalorimeters

Da bis auf H alle Werte bekannt sind, kann vereinfachend eine Energiefreisetzung als Grenzwert zwischen den beiden Pfaden festgesetzt werden. Ist die errechnete Energiefreisetzung (Q_{total}) der Rechnung mit 0,35 m² Feuerfläche größer als 59 kW, so muss die Rechnung mit A_{max} = 0,6 m² wiederholt werden (Pfad III). Ein kleinerer Wert bedeutet, dass die Annahme des Pfades II (0,35 m²) richtig war. Der Wert von 59 kW steht repräsentativ für eine Flammenhöhe von 1,5 m und wurde durch Versuche des DIFT (vgl. [52] [53]) mehrfach überprüft und validiert.

Im SBI-Test wird der Probekörper einer definierten Wärmestromdichte ausgesetzt. Im Cone-Kalorimeter kann die Wärmestromdichte allerdings frei gewählt werden. Bei unterschiedlichen Wärmestromdichten von SBI und Cone-Kalorimeter müssen daher die Zündzeitpunkte und die Energiefreisetzung des Cone-Kalorimeters angepasst werden.

Für den Zündzeitpunkt wählt man einen linearen Korrekturfaktor, der sich wie folgt berechnet:

$$\Phi_{ign} = \frac{\dot{Q}_{Cone}}{\dot{Q}_{SBI}}$$

Die Energiefreisetzung aus dem Cone-Kalorimeter-Versuch wird mit folgendem Korrekturfaktor angepasst

$$\Phi_{HRR} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{SBI}}{\dot{Q}_{Cone}}}$$

Das Modell wurde von verschiedenen europäischen Instituten überprüft. Die Genauigkeit hängt unter anderem von dem zu prüfenden Material ab.

In den meisten Versuchen konnte jedoch vor allem der ansteigende Teil der Energiefreisetzungskurve gut vorausgesagt werden.

Das Vorhersagemodell bietet somit eine günstige Alternative, um Materialien zu prüfen und deren Brandverhalten festzustellen. Dies eignet sich besonders in der Materialforschung und der Produktentwicklung. Im Rahmen von Zulassungsprüfungen kann aber nicht auf die mittel- bis großskaligen Prüfungen wie den SBI-Test verzichtet werden.

Im Rahmen dieser Untersuchungen soll das Modell beispielhaft auf die durchgeführten Versuche angewendet werden. Für die Berechnung wurde auf eine Excel-Tabelle zurückgegriffen, in die das Modell implementiert wurde.

4.6.3.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den realen Ergebnissen

Das oben beschriebene Modell wurde von Van Hees [53] vor allem für kunststoffbasierte Stoffe und Wandbekleidungen überprüft und nachgewiesen. Bild 90 zeigt den Vergleich zwischen dem Vorhersagemodell und dem realen Versuchsergebnis beispielhaft für die Cellulose-Platte M. Die Simulationen wurden mit drei unterschiedlichen Ergebnissen aus Cone-Kalorimeter-Versuchen durchgeführt. Die Simulationen basierten alle auf Pfad III (0,6 m²) des Feuerwachstums (vgl. Bild 88)

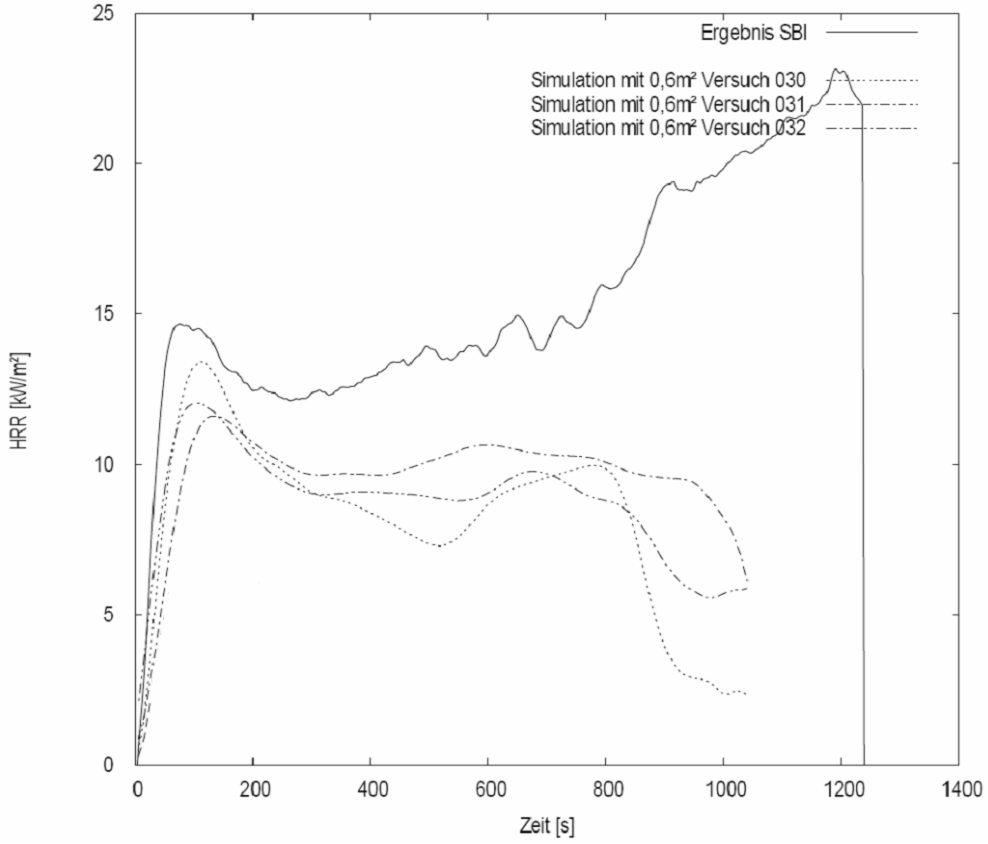


Bild 90: Vergleich zwischen Vorhersagemodell und realen Ergebnissen

Das Modell zur Vorhersage von SBI-Ergebnissen liefert für die Cellulose-Platte M gute Ergebnisse bei der Wärmefreisetzungsrate in den ersten Minuten. Diese Genauigkeit in der Anfangsphase der Wärmefreisetzung wird auch von Van Hees im Prüfbericht „Prediction of SBI test results by means

of Cone Calorimeter Test results“ [53] beobachtet und beschrieben. Im späteren Verlauf fallen die Vorhersagen der Simulationen ab, während die Werte des SBI-Versuchs einen Anstieg der Wärmefreisetzung aufweisen.

Entscheidend für das Vorhersagemodell sind die zu erwartenden FIGRA-Werte, da diese für die Klassifizierung maßgebend sind. Aus Tabelle 133 erkennt man, dass die Simulationsergebnisse deutlich von den SBI-Ergebnissen abweichen. In allen untersuchten Fällen sind die Simulationsergebnisse geringer. Trotzdem konnte für die FIGRA-Werte bei Versuch und Simulation die gleiche Rangfolge ermittelt werden. Die Einstufung in die Euroklassen stimmte nur für die Flachs-Matte G und die Cellulose-Platte M.

Tabelle 133: Vergleich Simulation und SBI-Versuch

Material	**SBI**			**Simulation (Conetools)**		
	FIGRA [W/s]	**Euroklasse**	**Rang**	**FIGRA [W/s]**	**Euroklasse**	**Rang**
Seegras- Schüttung X	135,7	C	1	28	B	1
Flachs-Matte G	158,4	C	2	127	C	2
Cellulose-Platte M	220,8	C	3	132	C	3
Holzspan-Schüttung B	1689,7	E	4	310	C	4

Das oben beschriebene Vorhersagemodell eignet sich somit mit Einschränkungen vor allem für die Entwicklung von Produkten, da ein Rückschluss auf das Brandverhalten kurz nach der Entzündung günstig und effizient möglich ist. Für ein genaues Ergebnis in der Simulation ist vor allem das präzise Erfassen des Zündungszeitpunktes erforderlich. Als Alternative zum manuellen Erfassen des Zündungszeitpunktes wird in einem weiteren Bericht von Van Hees [53] auch das überschreiten eines Wertes der Wärmefreisetzungsrate (z. B. 10 kW/m²) als „Zündzeitpunkt“ diskutiert.

4.6.4 Untersuchung des Glimmverhaltens

In den Baustoffprüfungen nach deutscher Norm wird das Glimmverhalten für brennbare Baustoffe in der Brandschachtprüfung nach DIN 4102-1, Abschnitt 6 berücksichtigt. Im neuen, europäischen Klassifizierungsverfahren werden im SBI-Versuch an das Glimmverhalten bisher keine Anforderungen gestellt.

In Deutschland bleibt die Anforderung an das Glimmen schwerentflammbarer Baustoffe jedoch bestehen und wird derzeit weiterhin im Brandschacht beurteilt (vgl. Kapitel 4.3.3.1).

Bei der Entwicklung einer Prüfung zur Untersuchung des Glimmverhaltens von Baustoffen sollte an bestehende Prüfungen angeknüpft werden. Ein Vorschlag vom Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfahlen [54] bedient sich dazu der Versuchseinrichtung des SBI-Versuches. Hierzu wird ein 1000mm x 1500mm x 200mm großer Kasten aus Kalziumsilikatplatten hergestellt, der somit der Größe des großen Probenflügels des SBI-Versuches entspricht. Die Deckplatte des Kastens hat im Bereich des Sandbettbrenners eine Aussparung von 250mm x 250mm, um eine Entzündung des Dämmmaterials zu erreichen. In dem Kasten sind mehrere Thermoelemente angeordnet um das Fortschreiten der Glimmfront feststellen zu können.

Eine detaillierte Beschreibung der Prüfung sowie Ausführungen zur Versuchsdurchführung von -auswertung erfolgt in der Studienarbeit „Optimierung des Flammschutzmittelgehaltes von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich der europäischen Baustoffklasseneinteilung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte“ [51].

4.6.4.1 Herstellung der Probekörper

In Anlehnung an den zuvor beschriebenen Versuchsaufbau wurden die Probekörper hergestellt. Jedoch wurde die Kastendicke auf 100 mm reduziert und statt der Kalziumsilikatplatten wurden Gipsfaserplatten der Baustoffklasse A2 nach DIN 4102-1 verwendet. Zur Positionierung der Thermoelemente wurden an der Rückseite des Probekörpers Maschinenschrauben befestigt, die bis in die Mitte des Probekörpers hineinragten.

Die Anordnung der Thermoelemente ist Bild 91 zu entnehmen. Der erste Versuch wurde entsprechend dem Vorschlag der MPA NRW durchgeführt (a). Für die Versuche zwei bis vier wurden zusätzliche Thermoelemente montiert, um die Temperaturentwicklung innerhalb des Probekörpers besser erfassen zu können.

Das Probenmaterial wurde von oben in den Kasten eingefüllt. Nach dem Einfüllen wurde der Kasten in die Versuchseinrichtung des SBI gestellt. Die Öffnung zum Beflammen wurde genau über dem Brenner positioniert. Damit kein Material aus der Öffnung austreten konnte, wurde diese mit einem Metallgitter versehen. In weiteren Versuchen wurde dieses Metallgitter durch ein dünnes Blech ersetzt, sodass das Material nur durch die Wärme, nicht aber durch direkte Flammeneinwirkung entzündet wurde. Als schmaler Probenflügel diente eine Gipsfaserplatte als „Dummy“.

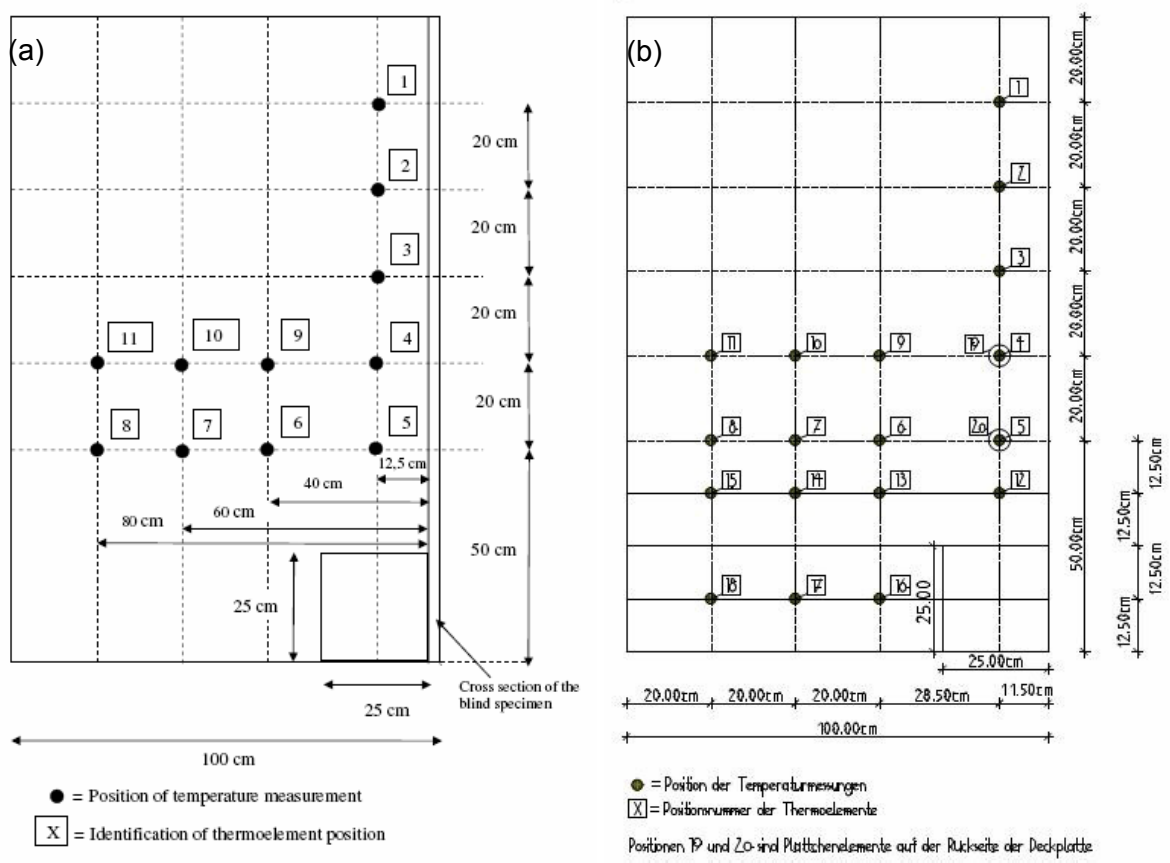


Bild 91: Anordnung der Thermoelemente nach Vorschlag der MPA NRW (a) und mit zusätzlichen Elementen (b)

4.6.4.2 Versuchsdurchführung

Mit Beginn des Versuches wurde der Sandbrettbrenner gezündet und mit der Aufzeichnung der Daten der Thermoelemente begonnen. Diese wurden im Abstand von 30 Sekunden aufgezeichnet. Die Flamme des Sandbettbrenners wurde entsprechend den Vorgaben der DIN EN 13823 über 20 Minuten bei 40 kW/m² gesteuert.

Nach dem Abschalten der Flamme wurde der Kasten für mehrere Stunden im Versuchsraum belassen und die Daten der Thermoelemente weiter aufgezeichnet.

4.6.4.3 Versuchsergebnisse

Beispielhaft ist in Bild 92 die Temperaturentwicklung des Versuchs mit der Holzspan-Schüttung X dargestellt. Die Beflammung erfolgte über ein Kupferblech. Es ist anhand der Temperaturentwicklung zu erkennen, dass auch nach Wegnahme der Beflammung der Dämmstoff selbstständig weiterglimmte.

Nach Erlöschen des SBI-Brenners war im Bereich der Kupferfolie hellrote Glut zu erkennen, da diese sich leicht verformt hatte. Die Temperaturen waren schnell auf Werte bis 600 °C angestiegen. Flammen waren allerdings nicht sichtbar. Wie auf Bild 92 weiterhin zu erkennen ist, waren nach

knapp 4 Stunden immer noch Temperaturen größer 400 °C vorhanden. Es war also eine deutliche Glimmneigung erkennbar.

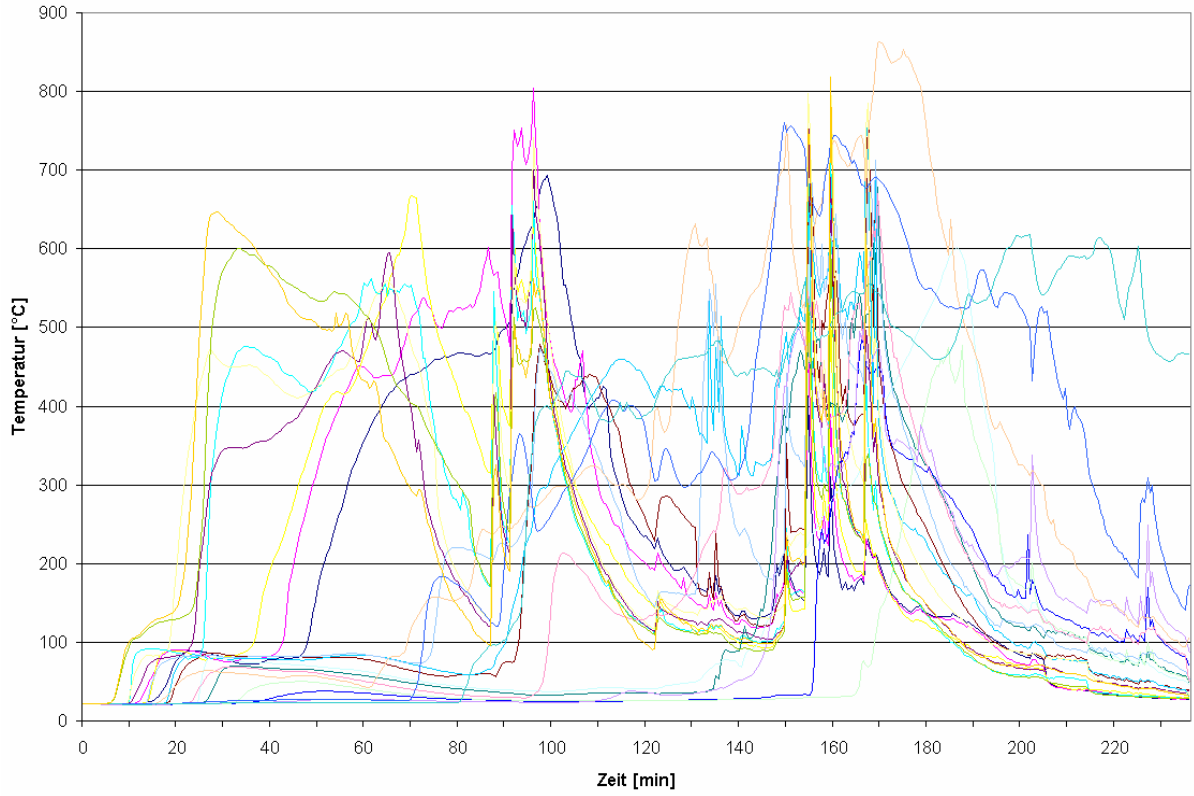


Bild 92: Temperaturdaten der Thermoelemente 1 – 20 im Versuch mit dem Dämmstoff Holzspan-Schüttung X und Kupferfolie

4.6.4.4 Beurteilung des Prüfverfahrens

Die orientierenden Versuche zum Glimmverhalten bei Dämmstoffen zeigten deutlich die Notwendigkeit eines europäischen Prüfverfahrens zum Schwel- und Glimmverhalten, da dieses ein nicht unerhebliches Gefahrenpotential birgt.

Momentan wird das Schwel- und Glimmverhalten im Rahmen des SBI-Tests auf europäischer Ebene nicht berücksichtigt, da der Versuch nach 20 Minuten abgebrochen wird und die Probe abgelöscht wird.

Der oben dargestellte Versuchsaufbau mit dem Glimmkasten scheint jedoch eine gute Basis zur Erfassung des Schwel- und Glimmverhaltens zu sein. Als Parameter zur Charakterisierung des Schwel- und Glimmverhaltens könnten Temperaturgradienten oder die seitliche Ausbreitung, bzw. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperatur angesetzt werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, wie unterschiedlich sich das Schwel- und Glimmverhalten schon bei zwei verschiedenen Dämmstoffen einstellen kann.

Ein Prüfverfahren auf Basis der Ergebnisse der MPA NRW und den hier gewonnenen Erkenntnisse könnte wie folgt aussehen:

- Der Aufbau des Prüfkastens erfolgt wie durch die MPA NRW vorgeschlagen
- Die Anordnung der Thermoelemente wird erweitert und erfolgt wie in Bild 91a dargestellt
- Der Temperatureintrag sollte durch ein dünnes Blech erfolgen. Bei direkter Beflammung besteht die Gefahr, dass sich ein Brand mit Flammenerscheinungen einstellt und kein Glimmen
- Die Versuchsdauer sollte mindestens fünf Stunden betragen
- Zur Klassifizierung könnten u.a. folgende Parameter dienen:
    - selbstverlöschend
    - Temperaturgradienten
    - die vertikale, bzw. horizontale Temperaturausbreitung
    - Ausbreitungsgeschwindigkeit des Glimmens

4.7 Optimierungen hinsichtlich der europ. Baustoffklassifizierung

Die Beurteilung des Brandverhaltens der Baustoffe nach dem europäischen Klassifizierungsverfahren beruht wie zuvor dargestellt auf folgenden 4 Prüfmethoden:

- Ofenprüfung
- Brennwertbestimmung
- SBI-Test
- Kleinbrennertest

Die Mindestanforderung, die alle Baustoffe erfüllen müssen, wird durch die Anforderungen der Euroklasse E beschrieben. Es erfolgt hierbei eine 15-Sekunden-Beflammung mit einer ca. 2 cm großen Flamme im sogenannten Kleinbrennertest nach DIN EN ISO 11925-2. Baustoffe, die diesen Test nicht bestehen werden der Euroklasse F zugeordnet und dürfen nicht verwendet werden. Zur Klassifizierung in die Euroklassen B bis D muss neben einer 30-sekündigen Beflammung im Kleinbrennertest der SBI-Test absolviert werden.

Beim SBI-Test ist grundsätzlich zwischen zwei Prüfmodellen zur Beurteilung des Brandverhaltens zu unterscheiden. Die eine Vorgehensweise beurteilt das Brandverhalten als Materialeigenschaft. Hierbei wird der Baustoff in seiner reinen Form direkt beflammt. Die zweite Vorgehensweise erlaubt es, das Brandverhalten der Baustoffe im Einbauzustand zu prüfen. Das bedeutet, dass das Brandverhalten der Gesamtkonstruktion beurteilt wird, bei der die Dämmstoffe z. B. durch eine Bekleidung geschützt sind.

Für die Euroklassen A1 und A2 müssen die Produkte die Anforderungen der Ofenprüfung und/oder der Brennwertbestimmung erfüllen. Dies ist für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen auch mit brandschutztechnischer Ausrüstung nicht erreichbar. Tabelle 134 stellt die beschriebenen Zusammenhänge zusammenfassend dar.

Tabelle 134: Zusammenstellung der europäischen Prüfmethoden

Euroklasse	Prüfmethode				
	Ofen-prüfung	Brennwert	SBI-Test		Kleinbrenner
			Material-eigenschaft	Einbau-zustand	
A1	X	X			
A2	X		X		
A2		X	X		
B			X		X_{30s}
				X	X_{15s}
C			X		X_{30s}
				X	X_{15s}
D			X		X_{30s}
				X	X_{15s}
E					X_{15s}
F					Nicht erfüllt

Da die Prüfung der Euroklasse E mit der nationalen B2-Prüfung identisch ist, erfüllen alle untersuchten Produkte diese Mindestanforderung, da sie bereits eine nationale Zulassung besitzen. Zum Erreichen besserer Euroklassen wurden die beiden zuvor erläuterten Möglichkeiten durchgeführt und bewertet.

4.7.1 Verbesserung des Baustoffverhaltens als Materialeigenschaft

Flammschutzmittel sind aus der heutigen Welt nicht mehr weg zu denken und sind in allen Bereichen des Lebens zu finden. So werden diese in Möbeln, in Kraftfahrzeugen oder im industriellen Maschinenbau und vor allem in der Elektrotechnik eingesetzt, um nur einige Beispiele zu nennen. Einer der wichtigsten Bereiche ist aber nach wie vor das Bauwesen, da schon immer brennbare Baustoffe (vor allem Holz), auch in tragenden Bauteilen, verwendet wurden und auch weiterhin eingesetzt werden.

Die Wirkungsweise von Flammschutzmitteln kann sehr unterschiedlich sein, zielt aber immer auf mindestens eine Komponente des sogenannten „Feuerdreiecks nach Emmons“ ab (Bild 93).

Dieses Dreieck zeigt anschaulich alle Komponenten, die für ein stabiles Feuer erforderlich sind, wenn sie im richtigen Mischungsverhältnis vorliegen. Diese Komponenten sind Brennstoff, Wärme (auch Zündenergie) und die Anwesenheit von Sauerstoff. Moderne Flammschutzmittel verhindern oder verzögern den Verbrennungsprozess durch chemische oder physikalische Wirkung, indem sie bei Erwärmung, Zersetzung, Zündung oder Flammenausbreitung in den Prozess eingreifen.

Bild 93: Feuerdreieck nach Emmons

Schwerpunkt der Untersuchungen war die Wirksamkeit ökologisch verträglicher Flammschutzmittel. Neben konventionellen Flammschutzmitteln wurden daher insbesondere Wasserglas, Lehm, Gips und Natriumchlorid untersucht. Eine ausführliche Analyse dieser Untersuchung ist der Studienarbeit „Optimierung des Flammschutzmittelgehaltes von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich der europäischen Baustoffklasseneinteilung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte“ zu entnehmen. In diesem Bericht werden lediglich zusammenfassend die Ergebnisse wiedergegeben.

4.7.1.1 Herstellung der Probekörper

Die Ertüchtigungsmaßnahmen mittels Flammschutzmitteln wurden an unbehandelten Holzspänen durchgeführt. Um eine möglichst gleichmäßige Benetzung der Dämmstoffoberfläche zu gewährleisten, wurden die Flammschutzmittel, die als wässrige Lösung vorlagen, aufgesprüht. Hierzu wurden handelsübliche Pumpsprühgeräte verwendet, wobei die Holzspäne während des Sprühvorgangs mehrfach gewendet wurden. Die Masse des Dämmstoffes wurde vor und nach dem Einsprühen gewogen, um den Massenanteil der zugefügten Lösung festzustellen.

Zuvor angestellte Überlegungen, bei allen Produkten einen Flammschutzmittelgehalt von etwa 20 % einzustellen mussten vorerst zurückgestellt werden. Eine vollständige Benetzung mit der Sprühflasche hätte so nicht erreicht werden können.

Gips und Lehm ließen sich auf Grund ihrer Viskosität nicht sprühen. In diesen Fällen mussten die Holzspäne getaucht werden. Auch das hatte deutlich höhere Massenanteile als 20 % zur Folge.

Um eine genaue Einstellung des Flammschutzmittelgehaltes und eine wasserähnliche Viskosität zu erreichen, müssten also die vorliegenden Wasserglaslösungen weiter verdünnt werde. Anzumerken ist hierbei, dass sich dann die aufgesprühten Mengen erhöhen müssten, da der prozentuale

Wasserglasanteil der Lösung bei weiterer Zugabe von Wasser absinken würde. Dies hätte den Vorteil, eine noch bessere Benetzung der gesamten Spanoberflächen zu erreichen.

Nach abschließender Wägung wurden die Proben in einen Trockenschrank (bei 105 °C) verbracht, wo sie bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden. Eine weitere Wägung der trockenen Probe dient als Plausibilitätskontrolle für die bereits berechneten Flammschutzmittelgehalte. Mögliche Abweichungen resultieren aus verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Eigenfeuchte des Dämmstoffes vor dem Trocknen, Abtropfen überschüssiger Wasserglaslösung nach der Feuchtwägung und technisch bedingte Fehler (Festkleben kleiner Spänen an den Unterlagen, Mess- und Rechenungenauigkeiten etc.).

Anschließend wurden die Dämmstoffe in der Klimakammer unter Normbedingungen (22 °C, 50 % rel. Luftfeuchte) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und entsprechend Kapitel 4.5.1.2 in das Cone-Kalorimeter eingebaut.

4.7.1.2 Untersuchung des Brandverhaltens im Cone-Kalorimeter

Das Cone-Kalorimeter wurde nach der Kalibrierung auf 40 kW/m² eingestellt, was nach ISO DTR 5660-3 Tabelle 2 einer Strahlungsstärke eines Brandes in einem Papierkorb entspricht. Diese Strahlungsstärke wurde ebenfalls für die in Kapitel 4.5.1.2 geschilderten Versuche benutzt und bietet daher eine gute Vergleichsmöglichkeit.

Die Versuchsdauer konnte auf 20 Minuten reduziert werden, da bei den meisten Proben bereits nach rund zehn Minuten fast das gesamte Material zersetzt war und sich das Sauerstoffniveau wieder auf den Ausgangswert eingestellt hatte.

In einer ersten, orientierenden Versuchsreihe wurde zunächst die Wirkung verschiedener Flammschutzmittel und Beimengungen auf das Brandverhalten im Cone-Kalorimeter untersucht. Zum Einsatz kamen Wasserglas, ökologische Flammschutzmittel wie Natriumchlorid, Gips und Lehm, aber auch herkömmliche Flammschutzmittel wie Borsäure und Ammoniumphosphat. Aus den Ergebnissen und Erkenntnissen wurde eine Auswahl der Flammschutzmittel ermittelt, die für weitere Untersuchungen herangezogen werden sollten.

Die zweite Versuchsreihe diente der Ermittlung des optimalen Anteils von Wasserglas und Natriumchlorid bezüglich des Brandverhaltens. Hierzu wurden jeweils drei verschiedene Mengenanteile (5 %, 10 % und 15 %) eingestellt und im Cone-Kalorimeter getestet.

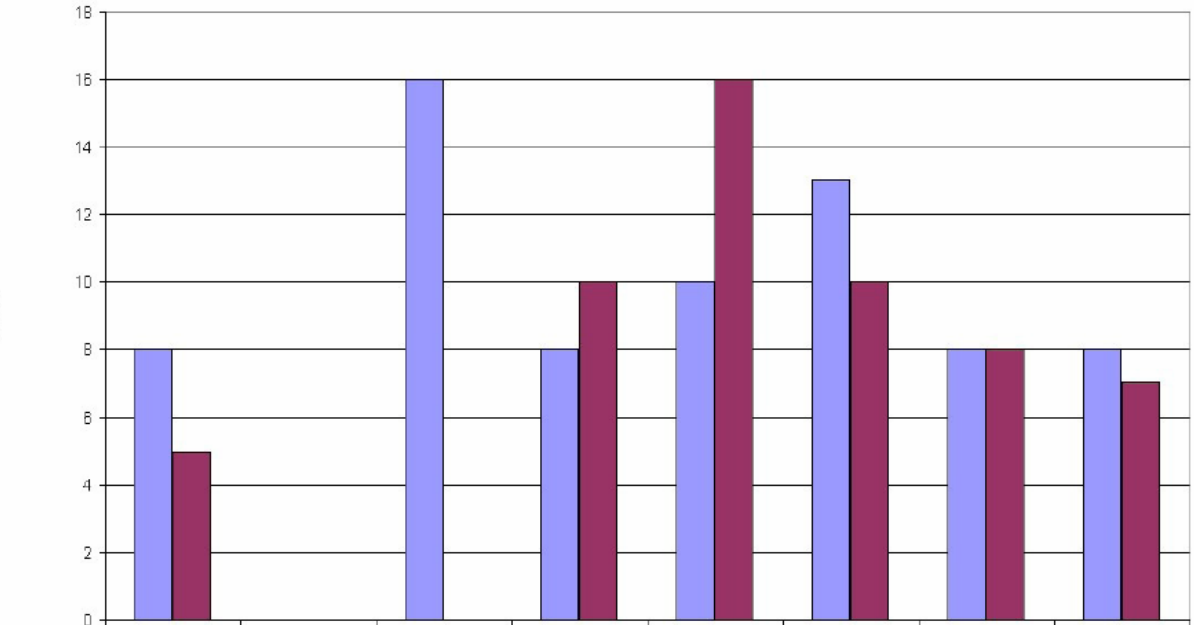
In der dritten Versuchsreihe wurde der optimale Gehalt von konventionellen Flammschutzmitteln ermittelt. Hierzu wurden Ammoniumphosphate und Borsalze in verschiedenen Anteilen (5 %, 10 % und 15 %) mit dem Dämmstoff vermengt und anschließend im Cone-Kalorimeter untersucht. Um den Einfluss der Flammschutzmittel bewerten zu können wurden Vergleichsversuche an unbehandelten Holzspänen durchgeführt.

4.7.1.3 Versuchsergebnisse (Cone-Kalorimeter)

4.7.1.3.1 Versuchsreihe 1

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse und zur Charakterisierung des Brandverhaltens sind unter anderem der Entzündungszeitpunkt und die relative Wärmefreisetzungsrate entscheidende Parameter.

Bild 94 zeigt die Entzündungszeitpunkte der ersten Versuchsreihe. Da das Alkalisilikat in beiden Proben und das Natriumsilikat in einer Probe nicht entflammte, sind die Werte in der Darstellung mit Null angegeben. Eine fehlende Entflammung ist hier allerdings auf die hohen Mengen des Wasserglases zurückzuführen, die den Proben beigemischt worden sind.



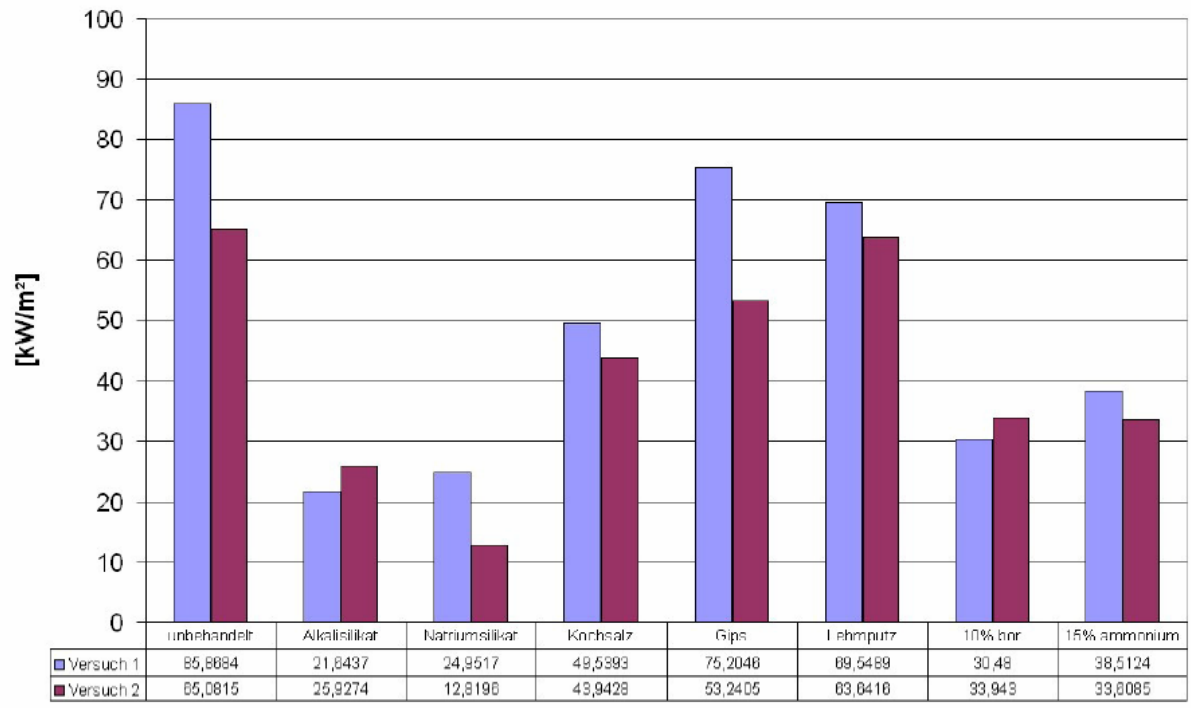
	unbehandelt	Alkalisilikat	Natriumsilikat	Kochsalz	Gips	Lehmputz	Borsaure	Ammoniumphosphat
Versuch 1	8	0	16	8	10	13	8	8
Versuch 2	5	0	0	10	16	10	8	7

Bild 94: Zündzeitpunkt

Borsalze und Ammoniumphosphat, beigemischt in üblichen Mengen von 10 bis 15 M.-% hatten keine großen Auswirkungen auf den Entzündungszeitpunkt gegenüber dem unbehandelten Material.

Lehmputz und vor allem Gips als Zusatz zögerten den Entzündungszeitpunkt hinaus. Dies könnte auf das gebundene Wasser zurückzuführen sein, welches unter der Hitzeeinwirkung abgespalten wurde und verdampfte. Dies wirkte zunächst kühlend und verzögerte die Freisetzung von Pyrolysegasen und damit den Entzündungszeitpunkt.

Neben dem Entzündungszeitpunkt spielt auch die Energiefreisetzungsrate eine große Rolle bei der Charakterisierung des Brandverhaltens. Hier soll ein Vergleich der maximalen Energiefreisetzungen und die Energiefreisetzung über die Dauer des Versuches dargestellt werden (Bild 95).



	unbehandelt	Alkalisilikat	Natriumsilikat	Kochsalz	Gips	Lehmputz	10% bor	15% ammonium
Versuch 1	85,8884	21,8437	24,9517	49,5393	75,2048	69,5489	30,48	38,5124
Versuch 2	85,0815	25,9274	12,8196	43,9428	53,2405	63,6416	33,943	33,8085

Bild 95: maximale Energiefreisetzungsrate

Zu beobachten sind hier wiederum die Vorteile der Borsalze und des Ammoniumphosphates. Diese beschränken die maximale Energiefreisetzung auf rund die Hälfte des unbehandelten Materials, während Gips und Lehmputz hier nur geringe Wirkungen haben.

Eine Vermutung hierfür wäre, dass sowohl Gips als auch Lehmputz ihr gebundenes Wasser unter Hitzbeaufschlagung sehr schnell abgeben. Somit würde, wie beobachtet, eine Entzündung zunächst verzögert. Über die gesamte Versuchsdauer gesehen kann dieser kurzzeitige Schutz allerdings nicht aufrecht erhalten werden.

Die Proben, die mit den Wasserglas ertüchtigt wurden, zeigten sehr geringe Energiefreisetzungen. Dies ist vor allem auf die hohen Anteile des Wasserglases am Probengewicht zurückzuführen. In einer weiteren Versuchsreihe soll der Gehalt auf übliche Mengen von 10 bis 15 M.-% eingestellt werden, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten.

Hervorzuheben ist die gute Wirkung des Natriumchlorids. Grund hierfür ist wahrscheinlich das Salz auf der Oberfläche der Holzspänen, dass nach dem Trocknen eine kristalline, nicht brennbar Schicht bildet. Somit wird der Zutritt von Wärme und Sauerstoff und auch die Energiefreisetzung behindert. Dieser Effekt wird vor allem bei der vorliegenden Probe sehr deutlich, da das Salz mit circa 35 M.-% vorliegt.

In einer weiteren Versuchsreihe sollen Proben mit geringeren Anteilen Natriumchlorid untersucht werden.

4.7.1.3.2 Versuchsreihe 2

In dieser Versuchsreihe wurde der Anteil der beiden Wasserglasprodukte und des Natriumchlorids auf 5, 10 und 15 M.-% eingestellt. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 wurden mit den Ergebnissen aus der ersten Versuchs-

reihe verglichen, um festzustellen, ob die drastische Senkung der Flammschutzmittelanteil von teils über 50 M.-% signifikante Auswirkungen auf das Brandverhalten hatte. Bild 96 und Bild 97 zeigen die Auswirkungen anhand des Zündzeitpunktes und der maximalen relativen Energiefreisetzungsrate.

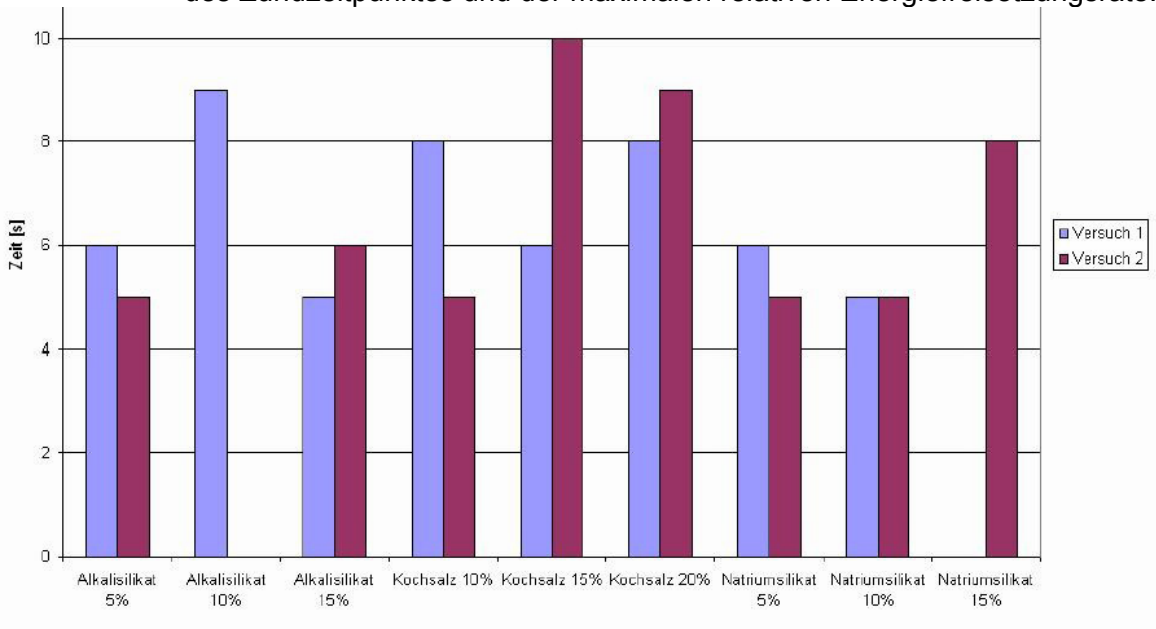


Bild 96: Vergleich der Zündzeitpunkte der Versuchsreihen 1 und 2

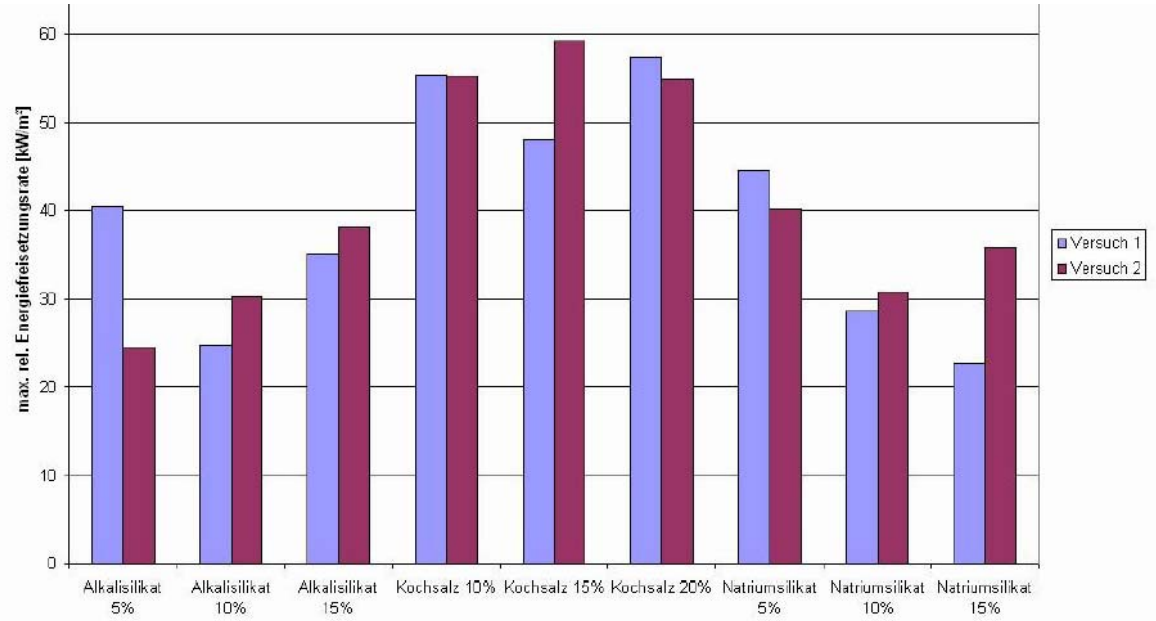


Bild 97: Vergleich der maximale Energiefreisetzungsrate der Versuchsreihen 1 und 2

Bei den mit Kochsalz ertüchtigten Proben konnte wiederum beobachtet werden, dass die Entzündung stark hinausgezögert wurde. Dies könnte auf die in der Versuchsreihe 1 genannten Effekte zurückzuführen sein.

Bezüglich der maximalen Energiefreisetzungsrate sieht man vor allem die positiven Auswirkungen des Wasserglases, welches eine gegenüber den unbehandelten Spänen fast halbierte maximale Energiefreisetzung erzeu-

gen. Die Schwankungen zwischen den beiden Versuchen können zum einen auf die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Proben zurückgeführt werden. Diese unterscheiden sich zum Teil stark von einander, da die Holzspäne im Verhältnis zur Gesamtoberfläche recht große sind.

Zum anderen ist gerade die maximale Energiefreisetzung ohnehin starken Schwankungen unterlegen. Eine quantitative Aussage kann und soll aufgrund der zwei durchgeführten Versuchen nicht gemacht werden.

Dennoch sind die Versuchsergebnisse im Rahmen der Schwankungen reproduzierbar und bilden eine gute Basis für qualitative Aussagen.

Deutlich ist aus Bild 96 und Bild 97 zu erkennen, dass beim Wasserglas Zugabemengen um 10 M.-% ausreichen, um die Energiefreisetzung im Vergleich zu dem unbehandelten Material stark zu verringern. Größere Beimengungen haben zwar eine weitere Verbesserung des Brandverhaltens zur Folge, dennoch rechtfertigt dieser Anstieg nicht der erhöhten Einsatz des Flammschutzmittelgehalts.

Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit bei der Herstellung der Probekörper und der Versuchsergebnisse wiesen das Alkalisilikat und das Natriumsilikat keine signifikanten Unterschiede auf. Sie sind in der gewählten Anwendung und dem gewählten Versuchsaufbau als gleichwertig zu betrachten.

Auch der Dämmstoff mit Kochsalz hat im Vergleich zum unbehandelten Dämmstoff eine reduzierte Energiefreisetzungsrate. Vor allem die Zündzeitpunkte wurden deutlich verzögert. Dennoch ist ein bauseitiger Einsatz als Flammschutzmittel ausgeschlossen, da das Salz aufgrund seines stark hydrophilen Verhaltens Feuchtigkeit anzieht, wodurch Schimmelwachstum begünstigt wird und die Wärmedämmwirkung verloren geht. Durch seine korrosive Wirkung, vor allem auf Metall, könnte das Salz außerdem Schädigungen im Bauwerk verursachen.

4.7.1.3.3 Versuchsreihe 3

In Versuchsreihe 3 wurden Flammschutzadditive auf der Basis von Ammoniumphosphat, das heutzutage sehr häufig eingesetzt wird,, untersucht. Im Rahmen dieser Versuchsreihe sollte überprüft werden, bis zu welchen Mengenanteil des Flammschutzmittels eine Verbesserung des Brandverhaltens erzielt werden konnte und ab wann eine weitere mengenmäßige Steigerung keine Verbesserung des Brandverhaltens mehr mit sich bringt.

Bild 98 und Bild 99 zeigen die Entzündungszeitpunkte und die maximalen Energiefreisetzungsraten der verschiedenen Ammoniumphosphate mit den unterschiedlichen Mengenanteilen.

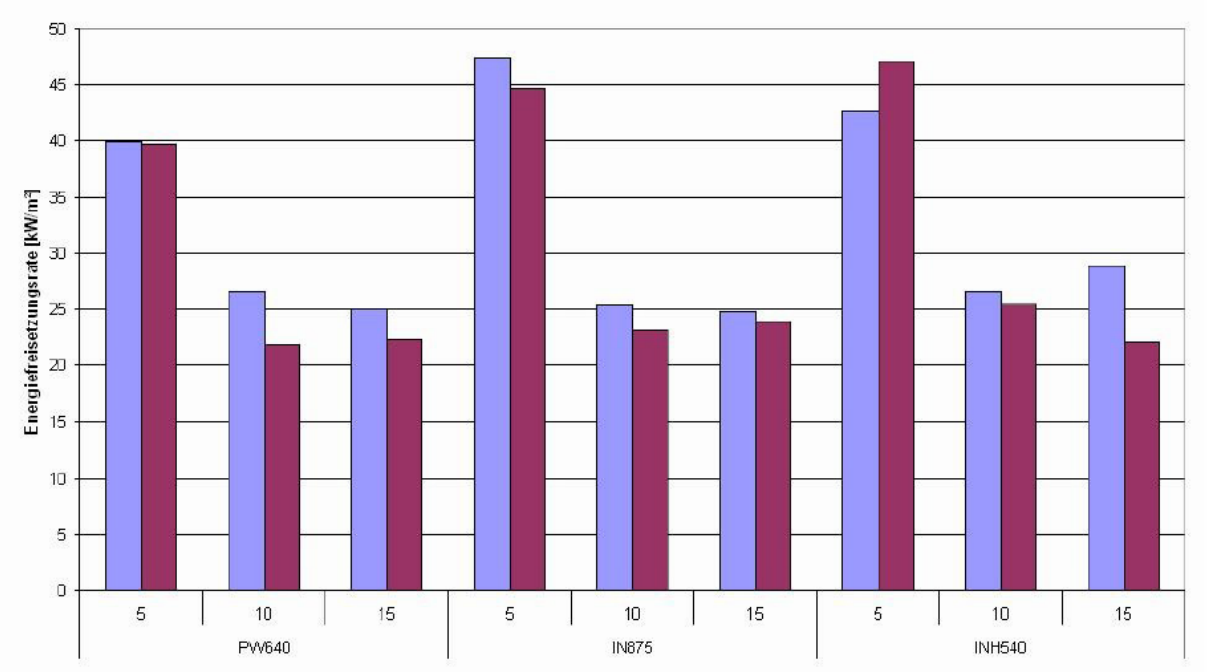


Bild 98: maximale Energiefreisetzungsraten

Man kann erkennen, dass bei Flammschutzmittelanteilen von 5 M.-% bei allen Materialien deutlich höhere Wärmefreisetzungen in den ersten zehn Minuten des Versuches gegenüber den stärker ertüchtigten Proben auftraten. Beim Vergleich der Proben mit 10 M.-% bzw. 15 M.-% Flammschutzmittel sind allerdings keine signifikanten Verbesserungen mehr zu erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass die Ammoniumphosphate bei einer Beimengung von rund 10 M.-% ein Optimum zwischen Menge und Wirkung erreicht haben.

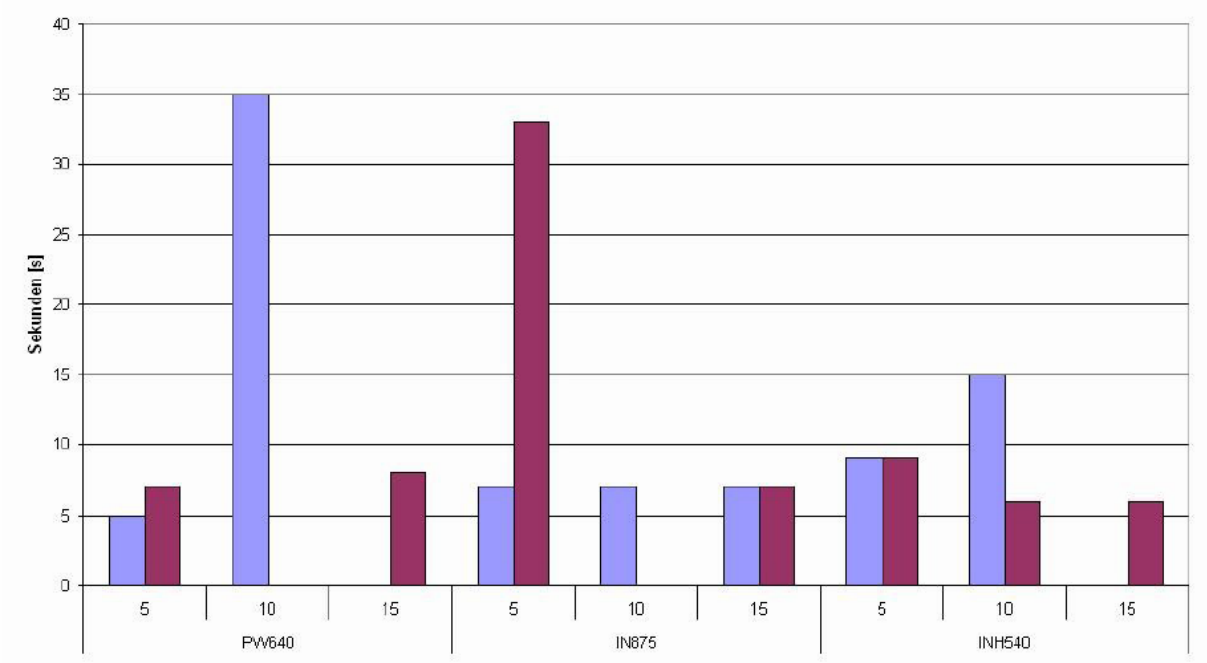


Bild 99: Zündzeitpunkt

Beim Vergleich der Zündungszeitpunkte bietet sich kein so eindeutiges Ergebnis wie beim Vergleich der max. Energiefreisetzungsraten. Die unregelmäßigen Entzündungszeitpunkte könnten auf die Oberflächenbeschaffenheit der Probe und die mangelhafte Benetzung einzelner Spane zurückzuführen sein. Ist kein Wert für die Probe angeben, so hat sich diese bei dem Versuch nicht entzündet. Es war jedoch zu beobachten, dass die Proben im Falle einer Entzündung mit sehr schwacher, gelblicher Flammenerscheinung brannte, die meist nach wenigen Sekunden wieder erlosch. Unter diesen Randbedingungen und unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse scheint eine derart kleine und kurze Entzündung keinen maßgeblichen Einfluss auf das Brandverhalten zu haben.

4.7.1.4 Durchführung von Kleinbrennerversuchen

Nach der Ertüchtigung der Holzspäne durch die genannten Flammschutzmittel und der darauf aufbauenden Ermittlung des optimalen Flammschutzmittelanteils im Cone-Kalorimeter wurde überprüft, inwiefern die Zugabe der Flammschutzmittel sich auf Ergebnisse von Normbrandversuchen im Brennkasten und somit auf eine mögliche Baustoffklassifizierung auswirkt.

Dazu wurden Probekörper mit den verschiedenen Flammschutzmitteln mit einem Anteil von je 10 M.-% hergestellt, da dieser Wert in den vorhergehenden Cone-Kalorimeter-Versuchen als Optimum zwischen Menge und Wirkung ermittelt wurde. Zur Beurteilung des Brandverhaltes sollten die Proben im Brennkasten nach EN 11925-2 mit einer Flammeneinwirkungsdauer von 30 Sekunden geprüft werden. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung ist Kapitel 4.6.1 zu entnehmen.

Es trat bei allen untersuchten Proben eine schnelle Entzündung auf. Diese liegt vor, wenn die sichtbare Flamme größer als die Flamme des Brenners ist und für mindestens drei Sekunden anhält. Ein brennendes Abfallen wurde nur bei den unbehandelten Spänen beobachtet werden. Hier fielen glimmende Spane durch die Maschen des Metallkorbes hindurch und entzündete in einem Fall das Filterpapier. Bei den unbehandelten Holzspänen entwickelten sich die Flammen schnell und erreichten schon nach rund zehn Sekunden die Messmarke von 15 cm. Bei diesen Versuchen wurden maximale Flammenhöhen von bis zu 25 cm beobachtet. Nach Entfernen der Flamme brannte die Probe noch einige Sekunden weiter. Ein deutliches Nachglimmen unter leichter Rauchentwicklung konnte für rund drei bis vier Minuten beobachtet werden.

Die mit Soda und Molke behandelten Holzspäne zeigten ein ähnliches Verhalten, wie das unbehandelte Material. Bei beiden Versuchen wurden die Messmarke nach rund 15 Sekunden erreicht, die maximale Flammenhöhe lag bei 18 cm. Ein Nachglimmen konnte für drei Minuten festgestellt werden.

Die beste Wirkung hinsichtlich des Brandverhaltens zeigten die Borate und die Ammoniumphosphate. Hier waren nur sehr geringe Flammenhöhen zu beobachten, die mit Ende der Beflammung sofort erloschen. Ein Nachglimmen war ebenfalls sehr gering und erlosch innerhalb weniger Sekunden vollständig.

Ein gutes Verhalten zeigten die mit Kochsalz ertüchtigten Proben. Es waren Flammenhöhen von sechs bis sieben Zentimetern zu beobachten. Mit

Entfernen der Brennerflamme erloschen die Flammen. Ein Nachglimmen trat für rund eine Minute auf.

Beim Wasserglas war zunächst ebenfalls ein gutes Brandverhalten zu beobachten. Die Flammenhöhe war mit maximal fünf Zentimetern verglichen mit den unbehandelten Spänen gering. Auch erloschen die Flammen mit Entfernen der Zündflamme sofort. Allerdings war ein starkes Nachglimmen zu beobachten. Nach ca. einer Minute nach Entfernen der Zündflamme kam es zu sehr starker Rauchentwicklung und stärker werdendem Nachglimmen, welches erst erlosch, nachdem das gesamte Probematerial im Metallkorb komplett verglimmt war. Das Glimmverhalten des mit Wasserglas ertüchtigten Materials ist somit auf Grundlage des Kleinbrennertests als schlechter einzustufen als das des unbehandelten Materials.

Tabelle 135: Versuchsergebnisse der direkten Beflammung

Material	Erreichen der Messmarke [s]	Maximale Flammenhöhe [cm]	Erlöschen der Flammen [s]	Ende des Glimmens [s]
Holzspäne unbehandelt	9	23	32	240
Holzspäne unbehandelt	12	25	38	180
Holzspäne + Molke	8	16	30	180
Holzspäne + Molke	10	18	33	180
Holzspäne + Kochsalz	-	6	30	60
Holzspäne + Kochsalz	-	7	30	45
Holzspäne + Alkalisilikat	-	5	30	> 600
Holzspäne + Alkalisilikat	-	4	30	> 600
Holzspäne + Natriumsilikat	-	7	30	> 600
Holzspäne + Natriumsilikat	-	6	30	> 600
Holzspäne + Borate	-	2	30	33
Holzspäne + Borate	-	2	30	34
Holzspäne + Ammoniumphos.	-	4	30	35
Holzspäne + Ammoniumphos.	-	2	30	31
Holzspäne + Ammoniumphos.	-	2	30	31
Holzspäne + Ammoniumphos.	-	1,5	30	31

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass vor allem Borate und Ammoniumphosphate als Flammschutzmittel eine gute Wirkung hinsichtlich der Entflammbarkeit haben. Gegenüber dem unbehandelten Material konnten für alle Flammschutzmittel Verbesserungen des Entzündungs-, Brand- und Glimmverhaltens erreicht werden. Das Nachglimmverhalten der Proben mit Wasserglas ist hingegen als kritisch zu bewerten, da gegenüber dem unbehandelten Material schlechtere Ergebnisse auftraten.

4.7.1.5 Durchführung eines SBI-Versuchs

Auf Grund der Laborversuche im Cone-Kalorimeter und der Kleinbrennerversuche hat sich eine Ertüchtigung der Holzspäne mit Ammoniumphosphat als effektiv erwiesen. Daraufhin wurde zur Durchführung eines SBI-Versuchs eine entsprechend große Menge des Rohmaterials mit einer wässrigen Lösung des Ammoniumphosphats gemischt, so dass der Anteil an Ammoniumphosphat 10 M.-% betrug. Auf Grund der hohen Menge erfolgte die Herstellung in einer Mischtrommel, in der das Aufbringen des Flammschutz über eine Spritzpistole erfolgte. So war eine homogene Benetzung gewährleistet. Trotzdem war zu erkennen, das Teile des Ammoniumphosphats wieder ausrieselten.

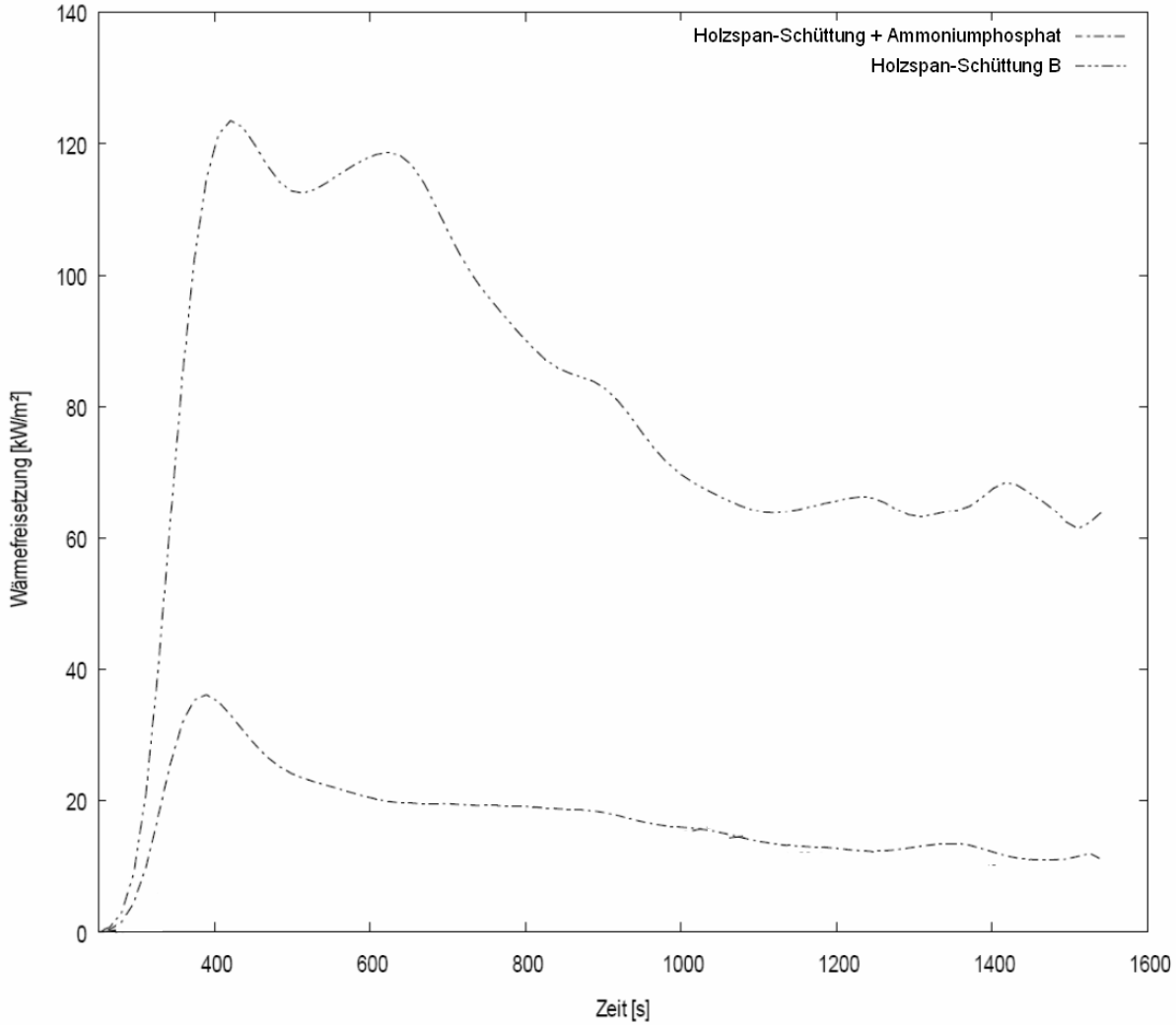


Bild 100: Wärmefreisetzungsraten der ertüchtigten und unbehandelten Holzspan-Schüttung B

Bild 100 zeigt die Wärmefreisetzungsraten der mit Ammoniumphosphat ertüchtigten Holzspäne im Vergleich zur Holzspan-Schüttung B. Die Holzspan-Schüttung B wies eine maximale Wärmefreisetzung von ca. 120 kW/m² auf, während die mit 10 M.-% Ammoniumphosphat benetzten Späne maximal ca. 40 kW/m² freisetzten. Dies zeigt deutlich die positive Wirkung des Flammschutzmittels und bestätigt die Untersuchungen im Cone-Kalorimeter. Obwohl die Wärmefreisetzung durch Zugabe des Am-

moniumphosphats halbiert wurde, konnte der FIGRA-Wert zum Erreichen der Baustoffklasse D (750 W/s) nicht ganz erreicht werden. Zum Erreichen der bauaufsichtlichen Anforderung schwerentflammbar (mindestens Euroklasse C) ist sogar eine Reduzierung des FIGRA-Werts auf unter 250 W/s erforderlich.

Tabelle 136: Ergebnisse der SBI-Versuche

	FIGRA [W/s]	THR_{600s} [MJ]	SMOGRA [m²/s²]	TSP_{600s} [m²]	Euroklasse
Holzspäne mit Ammoniumphosphat	761,2	13,9	54,9	206,7	(E),s2,d0
Holzspan-Schüttung B	1689,7	61,0	8,1	106,4	(E),s1,d0

4.7.2 Verbesserung des Baustoffverhaltens durch Einbaubedingungen

Die typischen Einsatzbereiche von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen sind die Zwischensparrendämmung im Dach und die Hohlraumdämmung im Holztafelbau. In beiden Fällen sind die Dämmstoffe meistens durch eine Holzwerkstoff-, Gipskarton- oder Gipsfaserplatte geschützt. Bei ausreichender Schutzwirkung der Bekleidung findet die thermische Zersetzung des Dämmstoffes nicht oder nur begrenzt statt und es können ohne Zugabe weiterer Flammschutzmittel höhere Euroklasse erzielt werden. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die Zugabe teilweise ökologisch bedenklicher Flammschutzmittel nicht erforderlich wird. Als Nachteil ist zu nennen, dass die Zulassung nur für die untersuchten Einbaurandbedingungen gültig ist. Bei wesentlichen Abweichungen muss der Nachweis erneut geführt werden. Grundvoraussetzung ist jedoch weiterhin, dass der Dämmstoff selbst die Mindestanforderung der Euroklasse E im Kleinbrennertest erfüllt. Durch die Einbaurandbedingungen wie z. B. Bekleidung ist es dann möglich, dass der Dämmstoff im gewählten Einbauzustand die Euroklassen D, C oder B erreichen kann.

Das gleiche Vorgehen ist ebenfalls zur Erzielung der Schwerentflammbarkeit für Wärmedämmverbundsysteme geeignet, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Die Reduzierung der thermischen Zersetzung erfolgt in diesem Fall durch eine entsprechende Dimensionierung des mineralischen Oberputzes. Dies war und ist für Wärmedämmverbundsysteme bereits national nach DIN 4102-1 für die Prüfung im Brandschacht möglich. Es existieren zum Beispiel B1-Zulassungen für Wärmedämmverbundsysteme auf Basis von Holzfaserdämmplatten. Gemäß Zulassungen ist eine zweilagige Putzschicht von jeweils 5 bzw. 6 mm notwendig. Der Unterputz muss dabei über eine entsprechende Armierung in Form eines Glasfaservlieses verfügen. Die B1-Zulassungen sind auf mineralische Untergründe beschränkt.

4.8 Anwendung brennbarer Dämmstoffe im mehrgeschossigen Holztafelbau

Die Kapitel 0, 4.9, 4.10 und 4.11 enthalten die wesentlichen Ergebnisse der Risikostudie und der durchgeführten Brandversuche zur Verwendbarkeit brennbarer Dämmstoffe in hochfeuerhemmenden Holztafelelementen der Gebäudeklasse 4. Eine ausführliche Darstellung der brandschutztechnischen Untersuchungen ist [55] zu entnehmen.

4.8.1 Ausgangssituation

Noch bis vor wenigen Jahren war es nach Baurecht nicht möglich, Gebäude mit einer Höhe von mehr als 7 m (Fußboden des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen über der Zugangsebene) in ihrer tragenden Struktur aus Holz zu errichten. Erst mit der Novellierung der MBO im Jahr 2002 [24] und der Einführung der Gebäudeklasse 4 eröffnete sich dem Holzbau ein neuer Markt für Gebäude bis 13 m Höhe und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m². Dies konnte nur erreicht werden, da in einem Forschungsvorhaben nachgewiesen wurde, dass sich bei Einhaltung bestimmter konstruktiver Vorgaben das Brandrisiko im Vergleich zu Gebäuden in nichtbrennbarer Massivbauweise nicht erhöht. Um die konstruktiven Anforderungen aufgrund der Ergebnisse des Forschungsprojekts einheitlich zu regeln, wurde die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHHolzR, kurz Muster-Holzbaurichtlinie, erarbeitet [22].

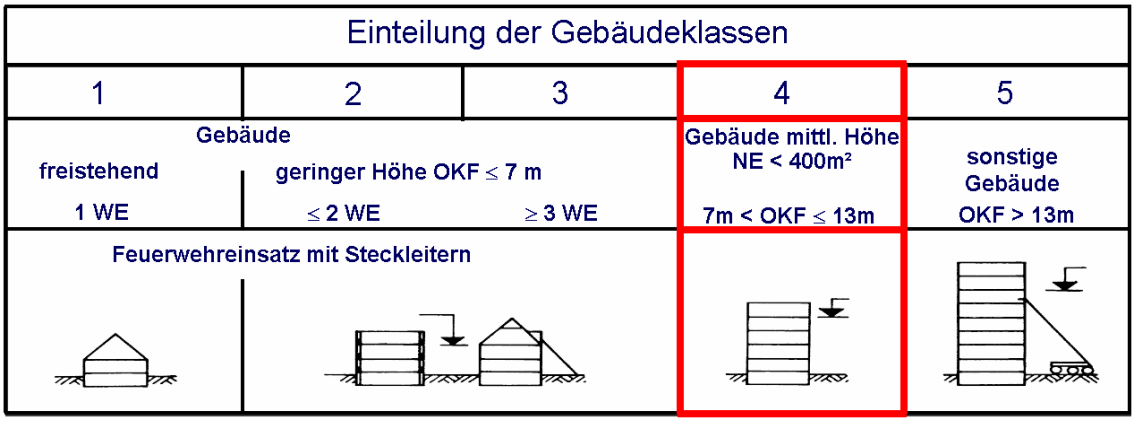


Bild 101: Einteilung der Gebäudeklassen

Zentraler Bestandteil der konstruktiven Anforderungen der Muster-Holzbaurichtlinie [22] ist, dass die tragende Holzstruktur durch eine nichtbrennbare Bekleidung über 60 Minuten Branddauer vor einer Entzündung geschützt wird. Die Brandschutzbekleidung muss dazu derart dimensioniert werden, dass an der Oberfläche der Holzbauteile eine Temperatur von 270 °C im Mittel und 290 °C im Maximum nicht überschritten wird. Außerdem muss zur Vermeidung eines Rauchdurchtritts bei raumabschließenden Bauteilen die Bekleidung mindestens zweilagig mit versetzten Fugen ausgeführt werden. Die Erweiterung in Richtung des mehrgeschossigen Holztafelbaus soll schrittweise unter Beobachtung der Erfahrungen in der Praxis vollzogen werden. Deshalb wurde gefordert, dass die Hohl-

räume der Holztafelelemente mit nichtbrennbarer Dämmung mit einem Schmelzpunkt > 1000 °C gefüllt werden. Brennbaren Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wie Hanf oder Flachs blieb damit der Einsatz im mehrgeschossigen Holzbau vorerst verwehrt.

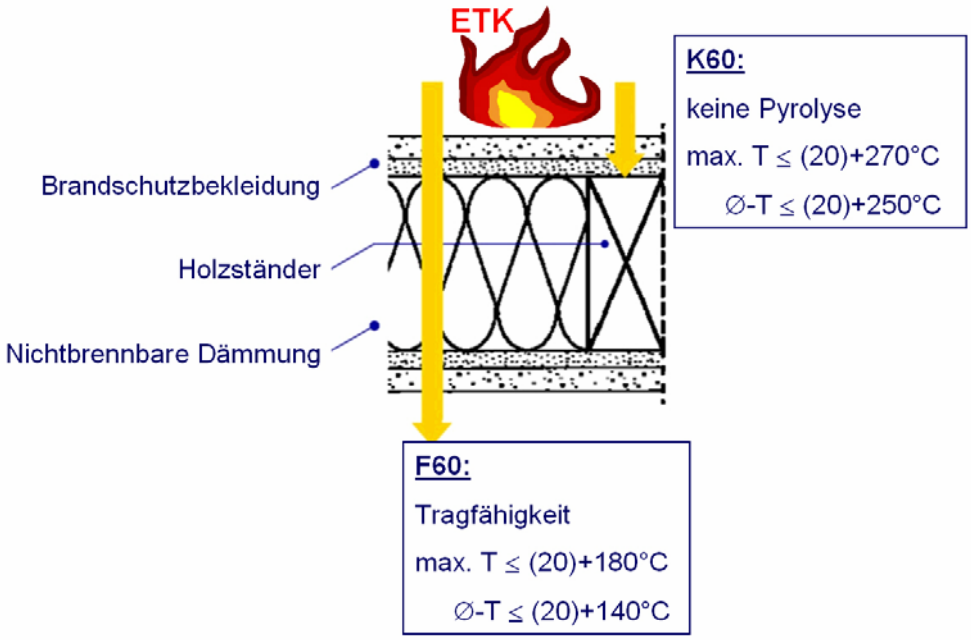


Bild 102: Schematischer Wandaufbau nach Muster- Holzbaurichtlinie

Im Rahmen dieses Verbundvorhabens sollte der Nachweis erbracht werden, dass bei Einhaltung bestimmter konstruktiver Randbedingungen auch brennbare Dämmstoffe eingesetzt werden können, ohne das akzeptierte Sicherheitsniveau im Brandschutz abzusenken.

4.8.2 Anforderungen an die Brandschutzbekleidung bei Verwendung brennbarer Dämmstoffe

Die Muster-Holzbaurichtlinie [22] sieht ein Verfüllen der für den Holztafelbaubau typischen Hohlräume mit nichtbrennbarer Dämmung vor, um einer Brandentstehung und -ausbreitung im Innern der Konstruktion vorzubeugen. Werden diese Hohlräume nun mit brennbaren Dämmmaterialien gefüllt, wird das brandschutztechnische Risiko offensichtlich erhöht, weil zusätzliche Brandlasten eingebracht werden, die zudem zum Glimmen neigen. Des weiteren muss berücksichtigt werden, dass sich bei den brennbaren Dämmstoffen bereits bei Temperaturen unterhalb der Entzündungstemperatur aufgrund der thermischen Zersetzung brennbare Gase bilden und im Bauteilinnern ansammeln können. Dies kann eine Gefahr für die Feuerwehr darstellen, die beim Löschangriff die Konstruktion öffnen muss, um eventuell vorhandene Glutnester zu löschen. Bei der Zufuhr von Sauerstoff können die Zersetzungsgase schlagartig durchzünden. Das Schutzziel der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung muss demnach bei Verwendung brennbarer Dämmstoffe dahingehend erweitert werden, dass nicht nur die Entzündung der Dämmstoffe verhindert, sondern auch deren Ausgasung vermieden werden muss.

Hinzu kommt, dass die Brandschutzbekleidung keine Schwachstellen in Form von Steckdosen, Schaltern oder Verteilerdosen aufweisen darf. Während solche Einbauteile beim Holztafelbau mit nichtbrennbarer Dämmung unbedenklich sind, sofern der Abstand zum benachbarten Holzständer mindestens 150 mm beträgt, können sie bei brennbarem Dämmmaterial zur Brandeinleitung in die Konstruktion führen. Ebenso dürfen keine elektrischen Leitungen als potenzielle Zündquellen ungekapselt in den Bauteilen geführt werden.

4.9 Bestimmung der thermischen Grenztemperatur

4.9.1 Bestimmung der therm. Grenztemperatur im Cone-Kalorimeter

Mit Hilfe des Cone-Kalorimeters nach ISO 5660 [48] sollte zunächst im Labormaßstab unter praxisnahen Bedingungen die maximale Temperatur bestimmt werden, bei der eine thermische Zersetzung der Dämmstoffe gerade noch nicht stattfindet. Dazu wurde ein oben offener Kasten aus Vermiculit-Platten mit den Innenmaßen 100 x 100 mm² und einer Höhe von 50 mm hergestellt. Dieser Probenkasten wurde vollständig mit dem zu untersuchenden Dämmstoff gefüllt und anschließend mit einer 18 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatte gemäß DIN 18180 [59] abgedeckt (Bild 103). Mittig auf der Unterseite der Gipskartonplatte wurde ein Thermoelement angeordnet, um die Temperaturentwicklung zu messen. Anschließend wurde der Probenkasten mit einer homogenen Wärmestromdichte von 20 kW/m² durch den elektrisch beheizten Strahler des Cone-Kalorimeters solange erwärmt, bis auf der Rückseite der Gipskartonplatte eine zuvor festgesetzte Temperatur zwischen 150 °C und 250 °C erreicht wurde. Dies geschah bei der gewählten Wärmestromdichte nach etwa 1 Stunde, was der geforderten Schutzdauer von 60 Minuten entspricht. Nach Erreichen der Temperatur wurde der Versuch sofort beendet, der Probekörper aus dem Cone-Kalorimeter entfernt und die Gipskartonplatte abgenommen.

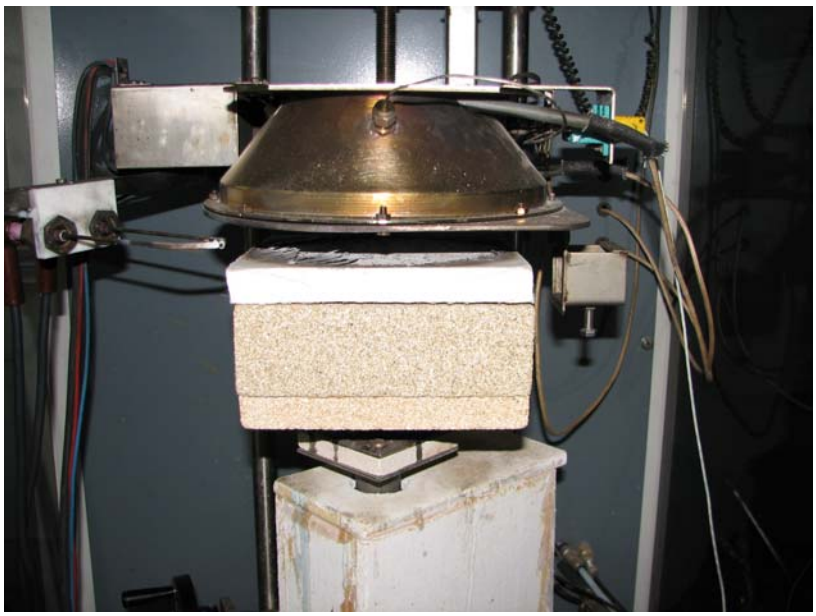


Bild 103: Probekörper im Cone-Kalorimeter

Anhand der Verfärbung der Dämmstoffoberfläche wurde festgestellt, ob bereits eine thermische Zersetzung des Materials vorlag. Bild 104 zeigt die Verfärbung der Oberfläche bei Versuchsende am Beispiel der Hanf-Matte AF. Wie zu erkennen ist, kommt es bei Oberflächentemperaturen von 275 °C, 250 °C und 225 °C zu deutlichen Verfärbungen des Dämmmaterials. Erst bei einer Begrenzung der Oberflächentemperatur auf 200 °C trat keine thermische Verfärbung mehr auf. Die Grenztemperatur für die thermische Zersetzung konnte somit für die Hanf-Matte AF auf 200 °C festgelegt werden.

Bild 104: Dämmstoffoberfläche nach Erreichen von 275 °C, 250 °C, 225 °C und 200 °C im Cone-Kalorimeter

Die bekannten 13 Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen wurden insgesamt auf diese Weise alle hinsichtlich ihrer thermischen Grenztemperatur untersucht. Mit dem zuvor geschilderten Versuchsaufbau im Cone-Kalorimeter ergaben sich Grenztemperaturen zwischen minimal 150 und maximal 225 °C. Die genaue Zuordnung der Grenztemperaturen zu den einzelnen Produkten ist Tabelle 137 zu entnehmen.

Tabelle 137: Grenztemperaturen der untersuchter Dämmmaterialien

Dämmmaterial	Grenztemperatur [°C]
Cellulose-Einblasdämmstoff M	225
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	225
Flachs-Matte K	225
Seegras-Schüttung X	225
Cellulose-Platte M	200
Hanf-Matte AF	200
Hanf-Wolle L	200
Holzspan-Schüttung B	200
Lehm-Holzfaserschüttung AE	200
Roggen-Schüttung W	200
Flachs-Matte G	175
Schafwoll-Matte A	175
Holzfaser-Platte M	150

4.9.2 Untersuchung der Rauchgasentwicklung

Für eine Anwendung im mehrgeschossigen Holzbau musste weiterhin nachgewiesen werden, dass bis zum Erreichen der thermischen Grenztemperatur die Rauchgasentwicklung der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nicht kritischer ist als bei nichtbrennbaren Baustoffen. Der Nachweis wurde in Anlehnung an das Prüfverfahren nach DIN 4102-1, Anhang A, „Prüfverfahren für die Bestimmung der Rauchentwicklung von Baustoffen - Zersetzung unter Verschwelungsbedingungen“ [39] geführt.

Entgegen den Vorgaben der Norm, die Materialien bei Temperaturen zwischen 250 °C und 550 °C zu prüfen, wurde das Rauchgasverhalten der brennbaren Dämmstoffe bei den zuvor ermittelten thermischen Grenztemperaturen untersucht. Denn im Einbauzustand werden durch bauliche Maßnahmen wie die entsprechend dimensionierte Brandschutzbekleidung im Brandfall höhere Temperaturbeanspruchungen als die thermische Grenztemperatur verhindert.

Der Prüfaufbau besteht aus einem 1 m langen Glasrohr mit einem Durchmesser von 40 mm, in dem sich der zu untersuchende Dämmstoff befindet. Das Glasrohr wird von einem Ringofen umschlossen, der durch einen automatischen Vorschub mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit von 10 mm/min über das Glasrohr bewegt wird.

Bild 105: Prüfaufbau zur Bestimmung der Rauchgasentwicklung

Während der Versuchsdauer von 25 Minuten wird der Dämmstoff auf die zuvor festgelegte Grenztemperatur erwärmt und die Lichtschwächung im Abgasstrom gemessen.

Wie Tabelle 138 zeigt, lag bei allen Dämmstoffen die mittlere Lichtschwächung bei der Grenztemperatur unter 5 % und damit deutlich unterhalb des für nichtbrennbare Baustoffe zulässigen Werts von 30 %. Damit ist für alle

untersuchten Materialien nachgewiesen, dass die Rauchentwicklung bei Einhaltung der Grenztemperatur als unkritisch einzustufen ist.

Tabelle 138: Rauchtrübung

Dämmmaterial	Prüftemperatur [°C]	Rauchtrübung [%]
Cellulose-Einblasdämmstoff M	225	0,1
Cellulose-Einblasdämmstoff Q	225	0,4
Flachs-Matte K	225	0,1
Seegras-Schüttung X	225	0,6
Cellulose-Platte M	200	3,0
Hanf-Matte AF	200	0,1
Hanf-Wolle L	200	0,0
Holzspan-Schüttung B	200	0,2
Lehm-Holzfaserschüttung AE	200	0,0
Roggen-Schüttung W	200	0,2
Flachs-Matte G	175	1,4
Schafwoll-Matte A	175	0,1
Holzfaser-Platte M	150	0,0

4.10 Durchführung von Normbrandversuchen mit kleinformatigen Bauteilen

4.10.1 Versuchsaufbau

Durch Brandversuche nach der Einheitstemperaturzeitkurve der DIN 4102-2 [56] im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [57] sollte die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Laborbrandversuchen im Cone-Kalorimeter hinsichtlich der thermischen Grenztemperatur auf reale Einbaubedingungen geklärt werden. Dabei sollte auch der Einfluss von Schrauben und Plattenstößen in der Brandschutzbekleidung auf eine thermische Zersetzung des Dämmmaterials untersucht werden.

Die Probekörper bestanden aus einem Holzrahmen mit den Außenabmessungen 52 x 52 cm². Auf diesem Rahmen wurde die Brandschutzbekleidung befestigt, die aus 2 Lagen Gipskartonplatten d = 12,5 mm, teilweise mit einer zusätzlichen Lage Holzwerkstoffplatten, bestand. Der Hohlraum wurde mit einer Hanf-Matte AF in 10cm Dicke gefüllt. Die Versuche wurden beendet, wenn auf der Rückseite der Brandschutzbekleidungen die thermische Grenztemperatur erreicht wurde.

4.10.2 Bestätigung der Grenztemperatur der thermischen Zersetzung

Es wurde geprüft, ob die im Cone-Kalorimeter ermittelten Grenztemperaturen auch unter realitätsnahen Bedingungen und Normbrandbeanspruchung zutreffen. Dazu wurde der Holzrahmen mit 2 Lagen GKF-Platten d = 12, 5 mm bekleidet. Während der Versuchsdauer von ca. 1 Stunde wurde die rückseitige Temperatur der Brandschutzbekleidung gemessen. Die Grenztemperatur von 200 °C für die Hanf-Matte AF konnte in dem Versuch bestätigt werden. Bild 6 zeigt, dass bei der Oberflächentemperatur von 200 °C noch keine thermische Schädigung des Materials vorliegt.

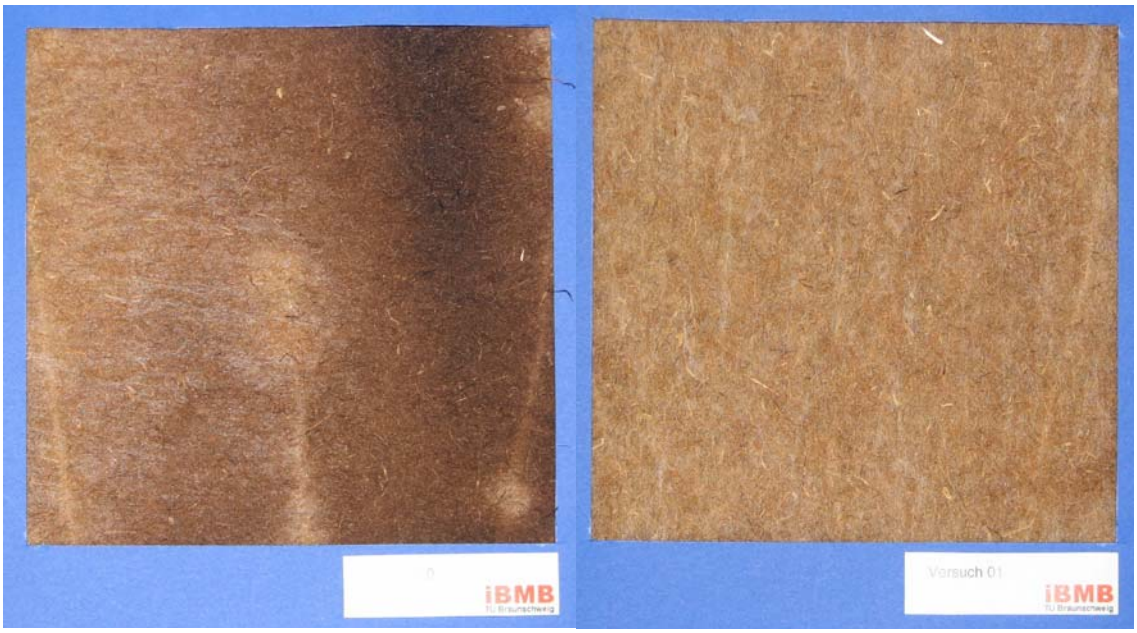


Bild 106: Oberfläche der Hanf-Matte AF nach Erreichen von 225°C und 200°C im Kleinbrandofen

4.10.3 Bestimmung des Einflusses von Fugen in der Brandschutzbekleidung

Weiterhin wurde untersucht, welchen Einfluss Fugen in der Brandschutzbekleidung auf die thermische Zersetzung des Dämmstoffes haben. Dazu wurden die beiden Lagen GKF-Platten versetzt zueinander gestoßen und verspachtelt.

Der Versuch wurde abgebrochen, als im ungestörten Bereich auf der Rückseite der Brandschutzbekleidung die Grenztemperatur von 200°C erreicht wurde. Die Temperaturen im Bereich des Stoßes der unteren GKF-Platte lagen zu diesem Zeitpunkt bereits bei 240 °C, was eine Schädigung des Dämmstoffes bewirkte (Bild 107). Der Stoß in der oberen Lage GKF-Platten wirkte sich hingegen nicht negativ aus.

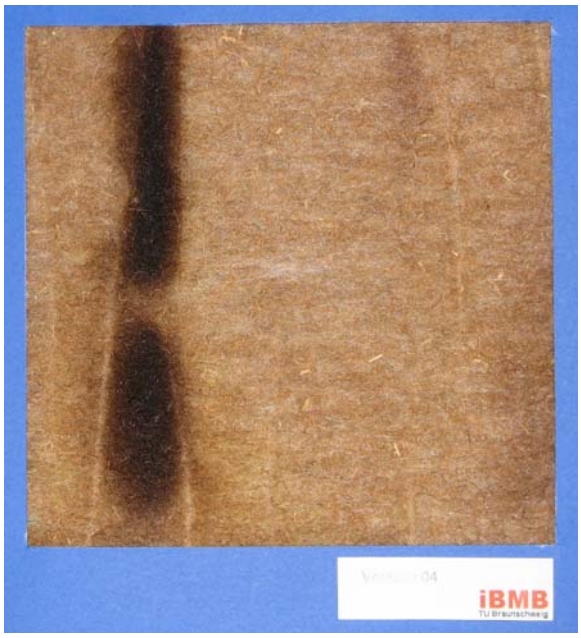


Bild 107: Thermische Zersetzung der Hanf-Matte AF im Stoßbereich der Brandschutzbekleidung

4.10.4 Nachweis des thermischen Schutzes durch Holzwerkstoffplatten

Die Einbausituation der Dämmstoffe im Holztafelbau lässt sich grundsätzlich in zwei Varianten einteilen. Im ersten Fall befinden sich die Dämmstoffe direkt hinter der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus Gipskarton- oder Gipsfaserplatten. In diesem Fall muss die Brandschutzbekleidung sowohl die Entzündung der Holzbauteile als auch die thermische Schädigung der Dämmstoffe verhindern. Im zweiten Fall befindet sich jedoch zwischen Brandschutzbekleidung und Dämmstoff zusätzlich eine Holzwerkstoffplatte. Die Brandschutzbekleidung muss dann nur die Anforderungen an den Entzündungsschutz der Holzbauteile sicherstellen, während die thermische Zersetzung des Dämmmaterials durch die Holzwerkstoffplatte verhindert wird.

Bild 108 zeigt das Ergebnis eines Versuchs, bei dem der thermische Schutz für den Dämmstoff aus 2 Lagen GKF-Platten d = 12,5 mm und einer 8 mm dicken Spanplatte bestand. Der Versuch wurde beendet, als eines der Thermoelemente auf der dem Feuer zugewandten Oberfläche der Holzwerkstoffplatte (TE 12 bis TE 16) die für Holz festgelegte Entzündungstemperatur von 270 °C erreichte. Auf der Rückseite der Spanplatte herrschten zu diesem Zeitpunkt Temperaturen von ca. 110 °C, so dass keine Gefahr für eine thermische Zersetzung des Dämmstoffes bestand. Dies wurde durch eine Begutachtung der Dämmstoffoberfläche nach dem Versuch bestätigt.

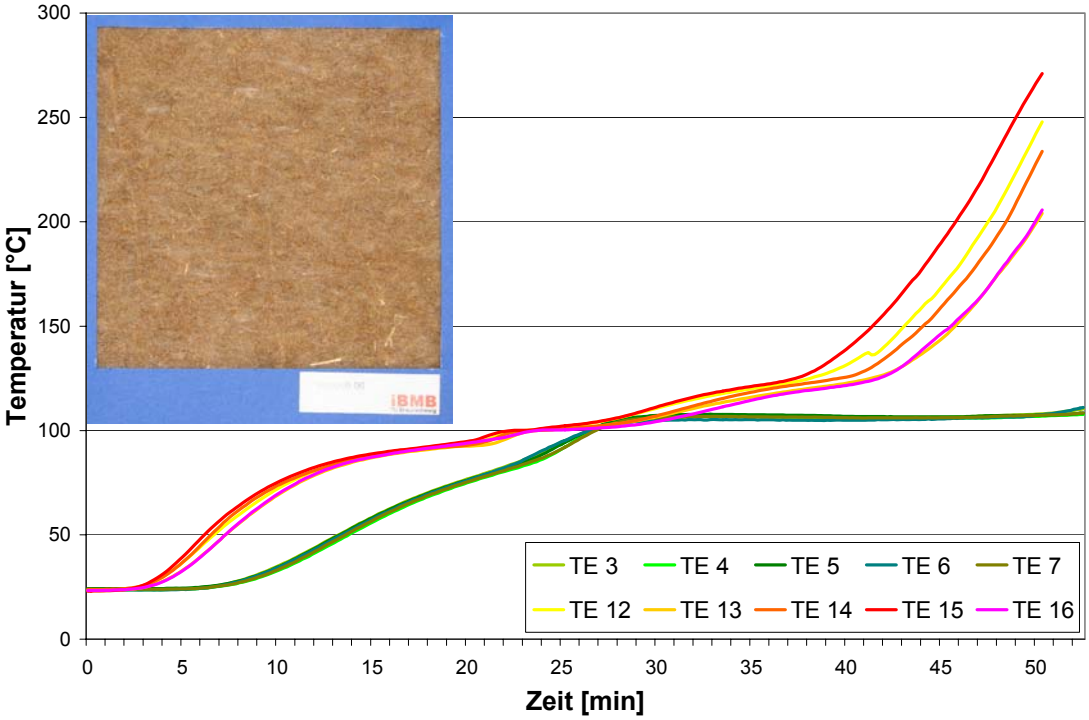


Bild 108: Temperaturentwicklung auf der Hanf-Matte AF bei thermischem Teilschutz durch eine Holzwerkstoffplatte

4.10.5 Einfluss metallischer Verbindungsmittel

Abschließend wurde der Einfluss von Schrauben auf das thermische Zersetzungsverhalten der Bauteile untersucht. Dazu wurden Schrauben durch beide Lagen bzw. nur durch die untere Lage der Brandschutzbekleidung in das Dämmmaterial geführt. Der Versuch wurde abgebrochen, als auf der Rückseite der Brandschutzbekleidung ohne Einfluss der Schrauben die Grenztemperatur von 200 °C erreicht wurde.

Wie zu erwarten war, strömte durch die Schrauben lokal zusätzlich Wärme in das Dämmmaterial. Entsprechend war in einem Radius von ca. 3 cm das Dämmmaterial verkohlt (Bild 109). Schrauben, die durch die obere Lage der Brandschutzbekleidung geschützt waren, wiesen zwar eine deutlich geringere Verkohlung auf, auch hier war jedoch eine punktuelle Verkohlung erkennbar.

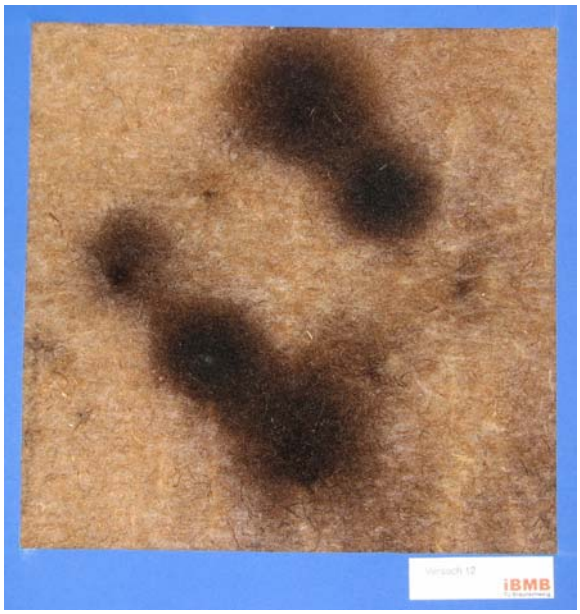


Bild 109: Thermische Zersetzung auf der Hanf-Matte AF bei durchgehenden Schrauben

4.11 Durchführung eines großmaßstäblichen Normbrandversuchs

Zum integralen Beleg der bisherigen Untersuchungsergebnisse wurde ein abschließender Normbrandversuch entsprechend DIN 4102-2 [56] mit einem Deckenelement und zwei Wandelementen in realer Größe durchgeführt. In diesem Versuch sollten Bauteile mit bereits klassifizierten Brandschutzbekleidungen in Verbindung mit den brennbaren Dämmstoffen geprüft werden. Zum Einsatz kamen bei dem Deckenbauteil eine klassifizierte K 60-Bekleidung, bei den Wandbauteilen eine K 30-Bekleidung in Verbindung mit einer Holzwerkstoffplatte. Die Brandschutzbekleidungen sind gemäß DIN EN 14135: 2004-08 [58] geprüft worden. Ziel der Untersuchungen war auch, weitere Erkenntnisse zum Brandverhalten von Bauteilen mit einem thermischen Teilschutz durch Holzwerkstoffplatten zu gewinnen.

Das Deckenbauteil bestand aus einem 1,20 x 1,70 m² großen Fichtenholzrahmen, der durch ein Längs- und ein Querholz in vier Felder unterteilt war. Das Bauteil war durch 2 Lagen GKF-Platten d = 18 mm geschützt. Die einzelnen Lagen der GKF-Platten waren jeweils auf einem Holzständer gestoßen und verschraubt. Die Felder 1 und 3 waren mit dem Dämmstoff Hanf-Matte AF (Grenztemperatur = 200 °C) gedämmt, die Felder 2 und 4 mit Schafwoll-Matten A (Grenztemperatur = 175 °C). Maßgebend für die Dimensionierung der Brandschutzbekleidung war der Bereich der Verbindungsmittel, an denen zuerst eine Verkohlung zu erwarten ist. Dies hatte zur Folge, dass während des Versuchs die Temperatur in den Feldern auf maximal 120 °C anstieg. Das bedeutet, dass der thermische Schutz der als K 60-geprüften Bekleidung ebenfalls für die untersuchten brennbaren Dämmstoffe ohne zusätzliche Maßnahmen ausreichend ist.

Nach 60-minütiger Beflammung wurde der Versuch beendet und der Dämmstoff sofort entnommen. Alle Thermoelemente zeigten Temperaturen von maximal 130 °C, die damit deutlich unter den thermischen Grenztem-

peraturen der Materialien lagen. Demzufolge waren auch keine thermischen Verfärbungen auf den Dämmstoffen erkennbar (Bild 110).

Bild 110: Dämmstoffoberflächen nach 60-minütigem Normbrand

Die Wandbauteile bestanden aus 0,60 x 1,00 m² großen Fichtenholzrahmen, die durch ein Querholz in zwei Felder unterteilt waren. Zum Einsatz kam eine K 30-Brandschutzbekleidung in Verbindung mit einer 12 mm dicken Spanplatte bzw. mit einer 15mm dicken OSB-Platte. Die Bekleidung bestand aus 2 Lagen GKF-Platten d = 12,5 mm gemäß DIN 18180 [59]. Die GKF-Platten wurden ohne Stoß montiert. Die Holzwerkstoffplatten waren entlang des Querbalkens auf halber Wandhöhe gestoßen und verschraubt. Der Schraubenabstand auf dem Querbalken variierte zwischen 15 cm und 10 cm. Die Felder waren mit Cellulose-Platten M (Grenztemperatur = 200 °C) bzw. Flachs-Matten K (Grenztemperatur = 225 °C) gedämmt.

Aus Vorversuchen war bekannt, dass der thermische Schutz dieser Bekleidung im ungestörten Feldbereich die Temperatur über mehr als 50 Minuten auf 270 °C begrenzt. Die Differenz zwischen der Entzündungstemperatur von Holz (270 °C) und der zulässigen thermischen Grenztemperatur der Dämmstoffe sollte bei diesem Versuchsaufbau durch die Holzwerkstoffbekleidungen ausgeglichen werden.

Anhand der Temperaturen auf der Spanplattenoberfläche war erkennbar, dass sich die Spanplatte ungefähr in der 55. Minute entzündete. Obwohl bei Versuchsende die Temperatur auf der Rückseite der Spanplatte mit ca. 100 °C deutlich unterhalb der thermischen Grenztemperatur der Dämmstoffe lag, wiesen die Dämmstoffe in der Mitte des Querholzes leichte Verfärbungen auf. Die ungestörte Fläche der Dämmstoffe war aber unversehrt.

Der Grund für die Verfärbungen war die Stoßfuge der Holzwerkstoffplatte, durch die Heißgase eindringen konnten. Eine Analyse der Stoßfuge zeigt den Grund des Verhaltens. Die Abstände der Schrauben zur Befestigung der Spanplatte variierten zwischen 10 cm an den Rändern und 15 cm in der Mitte (Bild 111). Der mittlere Bereich wies eine starke Verkohlung der

Spanplatte bis zum Holzriegel auf, während in den Randzonen nur die oberflächennahen Bereiche der Spanplatte verkohlt waren.

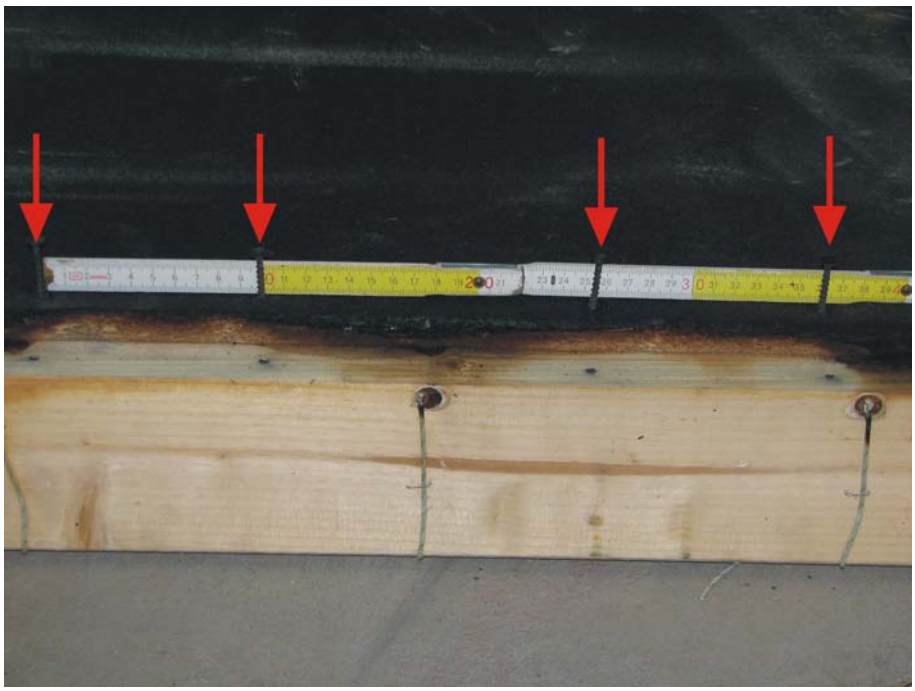


Bild 111: Schädigung der Spanplatte im Bereich des Plattenstoßes

Der abschließende Belegversuch hat die durch die Laborversuche gewonnenen Erkenntnisse bestätigt. Er zeigte jedoch, dass bei Einsatz einer Holzwerkstoffplatte zum thermischen Teilschutz der Abstand der Verbindungsmittel aus brandschutztechnischer Sicht reglementiert werden muss. Auf Basis der Versuchsergebnisse wird in Fugenbereichen ein maximaler Abstand der Verbindungsmittel von 8 cm vorgeschlagen, der ein frühzeitiges Eindringen der Heißgase verhindern soll.

4.12 Konstruktionsregeln

Auf der Grundlage der Risikoanalyse und der durchgeführten Brandversuche sind besondere Konstruktionsregeln zu beachten, wenn hochfeuerhemmende Bauteile in Holztafelbauweise unter Verwendung von brennbaren Dämmstoffen hergestellt werden.

4.12.1 Brandschutzbekleidung

Die gemäß Muster-Holzbaurichtlinie [22] erforderliche brandschutztechnisch wirksame Bekleidung muss gewährleisten, dass im Brandfall die Temperatur an der Oberfläche eines brennbaren Dämmstoffes dessen thermische Grenztemperatur nicht überschreitet. Die thermische Grenztemperatur ist definiert als diejenige Temperatur, bei der im Einbauzustand keine thermische Schädigung der Dämmstoffe auftritt und die Rauchfreisetzung im Vergleich zu nichtbrennbaren Dämmstoffen als unbedenklich einzustufen ist.

Als Prüfmethode für die Ermittlung der thermischen Grenztemperatur kann der zuvor beschriebene Prüfaufbau im Cone-Kalorimeter nach ISO 5660

[48] verwendet werden. Zusätzlich kann das „Prüfverfahren für die Bestimmung der Rauchentwicklung von Baustoffen“ bei reduzierter Temperatur in Anlehnung an DIN 4102-1, Anhang A [39] herangezogen werden.

4.12.2 Fugen in der unteren Lage der Brandschutzbekleidung

Fugen in der unteren Lage der Brandschutzbekleidung sind auf einem Ständer auszuführen. Wenn freie Stöße erforderlich sind, muss die Unbedenklichkeit gesondert durch Brandversuche nachgewiesen werden.

4.12.3 Holzwerkstoffplatten als Teil der Brandschutzbekleidung

Aufgabe der Brandschutzbekleidung im Holztafelbau ist es, die Temperatur der tragenden Holzstruktur im Brandfall auf 270 °C zu begrenzen. Liegt die Grenztemperatur eines brennbaren Dämmstoffs unterhalb von 270 °C, kann eine vorhandene Bekleidung aus Holzwerkstoffplatten zur Sicherstellung des vollständigen Temperaturschutzes mit herangezogen werden. In diesem Fall sind nicht zu vermeidende Stöße der Holzwerkstoffplatte auf einem Ständer auszuführen und kraftschlüssig zu verschrauben. Der maximale Abstand der Verbindungsmittel darf 8 cm nicht überschreiten.

4.12.4 Schrauben, Klammern, Nägel in der Brandschutzbekleidung

Werden Schrauben, Klammern oder Nägel auf einem Ständer ausgeführt, so ist der Nachweis der Unbedenklichkeit bereits durch die Klassifizierung der Brandschutzbekleidung nach DIN EN 14135 [58] erbracht. Wenn die Verbindungsmittel auch im Feld, das heißt mit direktem Kontakt zur brennbaren Dämmung, angeordnet werden, muss zusätzlich nachgewiesen werden, dass die Grenztemperatur eingehalten wird.

4.12.5 Elektroinstallationen außerhalb der Bauteile

Es dürfen keine Zündquellen innerhalb der Bauteile vorhanden sein. Elektroinstallationen wie Steckdosen, Lichtschalter, Elektrokabel und Verteilerdosen müssen außerhalb der Brandschutzbekleidung, z. B. in einer Vorwandinstallationsebene, geführt werden.

4.13 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Muster-Bauordnung und die jeweiligen Sonderbauverordnungen und Richtlinien erlauben ein breites Anwendungsgebiet von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Allein in Hochhäusern und Versammlungsstätten ist auf Grund der Baustoffanforderung nichtbrennbar die Verwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen untersagt. Die Analyse der Vorschriften zeigte, dass nur zwischen nichtbrennbaren und brennbaren Baustoffen unterschieden wird. Die Anforderung schwerentflammbar betrifft Dämmstoffe nur bei nichttragenden Außenwänden in Industriebauten und Wärmedämmverbundsystemen bei Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5.

Anschließend wurde das europäische Konzept zur Baugesetzgebung und die nationale und europäische Baustoffklassifizierung vorgestellt. Das nationale System mit den Baustoffklassen A1, A2, B1, B2 und B3 soll durch die Euroklassen A1, A2, B, C, D, E und F abgelöst werden. Derzeit existie-

ren beide Systeme parallel. Die Situation der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen stellt sich im bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren wie folgt dar. Der Verwendbarkeitsnachweis kann national weiterhin über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt erfolgen, da es sich um ein ungeregeltes Bauprodukt handelt. Ebenso kann eine europäische technische Zulassung (ETA) beantragt werden. Wenn keine Leitlinie für eine europäische technische Zulassung (ETAG) existiert, besteht die Möglichkeit, dass eine ETA erteilt wird. Das DIBt muss dazu Beurteilungsgrundlagen erstellen, die sog. CUAP (Common Understanding of Assessment Procedure) nach denen die Verwendbarkeit des Produkts nachgewiesen wird.

In dem Teilvorhaben wurde zunächst das Brandverhalten von 13 Dämmstoffen anhand vier unterschiedlicher Laborbrandversuche charakterisiert. Es kamen das Cone-Kalorimeter, die thermogravimetrische Analyse, Bestimmung des Masseverlusts und die Bestimmung des Flammpunktes zum Einsatz. Das Cone-Kalorimeter und die Bestimmung des Masseverlusts lieferten zur Charakterisierung der Dämmstoffe interessante und reproduzierbare Daten. Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse konnten zur Festlegung des Temperaturbereichs, in dem die thermische Zersetzung stattfindet herangezogen werden. Die Ergebnisse müssen mit Vorsicht gesehen werden, da auf Grund der geringen Einwaage und einer inhomogenen Materialzusammensetzung erhebliche Schwankungen auftreten können. Die Untersuchungen zur Flammpunktbestimmung haben sich für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen als ungeeignet herausgestellt.

Anschließend wurden für die 13 Produkte Zulassungsversuche durchgeführt. Auf Grund der Ergebnisse der durchgeführten Kleinbrennertests erfüllten alle untersuchten Produkte die Anforderungen der Euroklasse E und D. Einzige Ausnahmen bildete die Schafwoll-Matte A. Zur Einstufung in die Euroklasse D muss zusätzlich beim SBI-Test der FIGRA-Wert kleiner 750 W/s sein. Bei Stichprobenuntersuchungen konnte dies für die Produkte Cellulose-Platte M, Flachs-Matte G und Seegras-Schüttung X gezeigt werden. Die Holzspan-Schüttung B überschritt diesen Grenzwert. Baustoffe der Euroklasse D werden allerdings ebenfalls als normalentflammbare Baustoffe eingestuft.

Die Möglichkeit durch ein Brandmodell (Conetools) auf Grundlage von Cone-Kalorimeter-Versuchen Vorhersagen für Ergebnisse aus SBI-Versuchen treffen zu können, konnte nur für grobe Aussagen bestätigt werden. Das Modell ist jedoch in der Lage in Kombination mit Cone-Kalorimeter-Versuchen für Entwicklungszwecke vergleichende Aussagen treffen zu können.

Hinsichtlich des Glimmverhaltens wurde für alle untersuchten Produkte die Neigung zum Glimmen bestätigt (vgl. auch Kleinbrenner- und SBI-Versuche). Die Erkenntnisse unterstrichen die Notwendigkeit eines europäischen Prüfverfahrens zum Schwel- und Glimmverhalten, da dieses ein nicht unerhebliches Gefahrenpotential darstellt. Es wurden orientierende Prüfungen zum Glimmverhalten im SBI-Prüfstand auf Basis eines Entwurfes der MPA NRW durchgeführt. Momentan wird das Schwel- und Glimmverhalten im Rahmen des SBI-Tests auf europäischer Ebene nicht berücksichtigt, da der Versuch nach 20 Minuten abgebrochen und die Probe gelöscht wird. Der oben dargestellte Versuchsaufbau mit dem Glimmkasten scheint je-

doch eine gute Basis zur Erfassung des Schwel- und Glimmverhaltens zu sein. Als Parameter zur Charakterisierung des Schwel- und Glimmverhaltens könnten Temperaturgradienten oder die seitliche Ausbreitung, bzw. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Temperatur angesetzt werden.

In dem Projekt wurden unterschiedliche Flammschutzmittel zur Verbesserung des Brandverhaltens der Dämmstoffe untersucht. Es wurden sowohl ökologische Flammschutzmittel (Gips, Lehm, Salz, Wasserglas), als auch herkömmliche Flammschutzmittel (Borsalz, Ammoniumphosphat) untersucht. Als Referenzmaterial dienten Holzspäne. Durch Zugabe der Flammschutzmittel konnte zwar die Wärmefreisetzung und Flammenausbreitung reduziert werden, das Schwel- und Glimmverhalten wurde hingegen kaum beeinflusst. Die Anforderung schwerentflammbar (Euroklasse B und C) war für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen als Materialeigenschaft bei den untersuchten Randbedingungen für Deutschland nicht erreichbar. Der Grund hierfür liegt im Glimmverhalten. Zusätzlich zur Wärmefreisetzung dürfen schwerentflammbare Baustoffe nicht zum Glimmen neigen. Sowohl aktuelle als auch ältere Untersuchungen haben gezeigt, dass das Glimmverhalten der Dämmstoffe als sehr problematisch einzustufen ist. Auch die Zugabe von Flammschutzmitteln bringt nicht das gewünschte Ergebnis. Zudem ist zu beachten, dass der massive Einsatz von Flammschutzmitteln den ökologischen Vorteil der Dämmstoffe reduziert.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Nachweis der Schwerentflammbarkeit im Einbauzustand nachzuweisen. In diesem Fall wird der Dämmstoff z. B. innerhalb einer bekleideten Holztafel untersucht. Die Bekleidung reduziert die thermische Zersetzung, sodass die Grenzwerte der Euroklassen B oder C erreicht werden. Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass der Nachweis nur für die geprüfte Einbausituation Gültigkeit besitzt. Bei einer wesentlichen Änderung der Einbaubedingungen muss der Nachweis erneut geführt werden. Der Dämmstoff muss bei diesem Vorgehen ebenfalls die Mindestanforderungen der Euroklasse E erfüllen.

Für Wärmedämmverbundsysteme für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 ist ein ähnliches Vorgehen anzustreben. Auch hier sollte versucht werden, dass Brandverhalten durch einen Oberflächenschutz (Putz) zu verbessern und den Nachweis der Schwerentflammbarkeit wiederum für das Gesamtsystem im Einbauzustand nachzuweisen.

Die Anwendung brennbarer Dämmstoffe ist für hochfeuerhemmende Bauteile in Holztafelbauweise nicht vorgesehen. Die Muster-Musterholzbaurichtlinie schreibt vor, dass die Hohlräume hochfeuerhemmender Holztafelbauelemente mit nichtbrennbarer Dämmung mit einem Schmelzpunkt > 1000°C ausgefüllt werden müssen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Nachweis erbracht,, dass bei Einhaltung bestimmter konstruktiver Randbedingungen auch brennbare Dämmstoffe eingesetzt werden können, ohne das akzeptierte Sicherheitsniveau im Brandschutz abzusenken. Die Ergebnisse wurden durch Brandversuche belegt.

4.14 Literatur

[22] Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Muster-Holzbaurichtlinie - M-HFHHolzR); Fassung Juli 2004

[23] Datz, D.,: Anwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter Berücksichtigung der europäischen Baustoffklassifizierung; Studienarbeit am iBMB der TU Braunschweig; Juli 2006

[24] Musterbauordnung (MBO); Fassung November 2002

[25] Muster-Industriebaurichtlinie (MindBauRL); Fassung März 2000

[26] DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer; Ausgabe Mai 1998

[27] Muster-Beherbergungsstättenverordnung (MbeVO); Fassung Dezember 2000

[28] Muster-Garagenverordnung (MgarVO); Fassung August 1997

[29] Muster-Verkaufsstättenverordnung (MVkVO); Fassung September 1995

[30] Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV); Fassung Juni 2005

[31] Muster-Schulbaurichtlinie (MschulbauR); Fassung Juli 1998

[32] Muster-Hochhausrichtlinie (MhochhausRL);Fassung Mai 1981

[33] Grundlagendokument: Wesentliche Anforderung Nr. 2 “Brandschutz“, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. C 62/23 vom 28.2.1994

[34] Richtlinie des Rates vom 21.12.1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG), EG-Amtsblatt Nr. L40 vom 11.2.1989, S. 12

[35] Hertel, H.; Herzog, I.: Gundlagendokument Brandschutz und die zukünftigen Auswirkungen, Promat-Fachbeitrag

[36] Bauregelliste A, Bauregelliste B, Liste C; Ausgabe 2007/1

[37] Bauproduktenrichtlinie; 89/106/EWG

[38] Dobbernack, R., Riese, O.: Prüfung des Brandverhaltens von Baustoffen im Hinblick auf das neue europäische Klassifizierungssystem. IBMB der TU Braunschweig; Brandschutz bei Sonderbauten (Heft 163); Praxisseminar 2002

[39] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1; Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Ausgabe Mai 1998

[40] DIN 4102-15: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Brandschacht; Ausgabe Mai 1990

[41] DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1; Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Ausgabe Mai 2007

[42] DIN EN 13823: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Ausgabe Juni 2002

[43] DIN EN 11925-2: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Teil 2: Entzündbarkeit bei direkter Flammeneinwirkung; Ausgabe Juli 2002

[44] DIN EN ISO 1182: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Nichtbrennbarkeitsprüfung; Ausgabe Juli 2002-07

[45] DIN EN ISO 1716: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Bestimmung der Verbrennungswärme; Ausgabe Juli 2002

[46] Rademacher, H., Kühnen, S.: Parallelversuche an Bauprodukten im Single-Burning-Item-Test (SBI-Test) nach DIN EN 13823 und Brandschachtversuch nach DIN 4102 zur Schaffung einer Datenbank, Fraunhofer IRB Verlag, Publikation T3049; 2003

[47] DIN 4102-16: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 16: Durchführung von Brandschachtprüfungen; Ausgabe Mai 1998

[48] ISO 5660-1 Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen-Wärmefreisetzung, Rauchentwicklung und Masseverlustrate – Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone-Kalorimeter-Verfahren); Ausgabe Dezember 2002

[49] Kampmeier, B.: Charakterisierung des Brandverhaltens von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen mit Hilfe des Cone-Kalorimeters; Versuchsprotokoll des iBMB der TU Braunschweig; März 2006

[50] Biewald, K.:Untersuchung der thermischen Zersetzung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Rauchgasbildung; Studienarbeit am iBMB der TU Braunschweig; Juni 2007

[51] Albrecht, C.: Optimierung des Flammschutzmittelgehalts von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich der europäischen Baustoffeinteilung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte, Studienarbeit am iBMB der TU Braunschweig; August 2007

[52] Messerschmidt, B., Van Hees, P.,Wickström, U.: Prediction of SBI (Single Burning Item) test results by means of Cone Calorimeter Test results; Interflam 1999

[53] Van Hees, P.: The need for a small scale screening test for major euroclass test methods; Flame Retardants 2002

[54] Draft Test Procedure for the Evaluation of the Tendency to continous glowing of Building Producs; MPA Nordrhein-Westfahlen; Erwitte 2003

[55] Kampmeier, B.: Brandversuche zur Anwendbarkeit brennbarer Dämmstoffe in hochfeuerhemmenden Holztafelelementen der Gebäudeklasse 4, Untersuchungsbericht des iBMB der TU Braunschweig; Mai 2007

[56] DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Ausgabe September 1977

[57] DIN 4102-8: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand; Ausgabe Oktober 2003

[58] DIN EN 14135: Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung; Ausgabe November 2004

[59] DIN 18180: Gipsplatten - Arten und Anforderungen; Ausgabe Januar 2007

5 Schnelle Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Werk- und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Abhängigkeit vom Materialfeuchtegehalt und dem Dichteprofil

5.1 Einleitung

Eine besondere Herausforderung der heutigen Zeit ist der Umweltschutz, insbesondere der schonende Umgang mit den begrenzten, nichtregenerativen Energieressourcen der Erde. Das erfordert u. a. anspruchsvolle und effiziente Dämmmaßnahmen in Gebäuden, um wirkungsvoll Heizenergie einzusparen. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen schneiden bei einer ökologischen Bewertung zweifelsfrei günstiger ab als herkömmliche Materialien wie Kunststoffschäume oder Mineralfasern. Trotz dieses Vorteils müssen sie selbstverständlich vergleichbare thermische Eigenschaften aufweisen, um am Markt bestehen zu können. Optimierte Aufschlussverfahren und eine sorgfältige Überwachung des Herstellungsprozesses müssen hier helfen, die vom Kunden erwartete hohe Qualität des Dämmstoffes sicher zu stellen.

Zur Optimierung des Produkts und zur Überwachung seiner Qualität ist ein Messverfahren notwendig, das die Bestimmung seiner thermischen Transporteigenschaften auch unter dem Einfluss erhöhter Materialfeuchten mit hoher Messgenauigkeit ermöglicht. Diese Anforderungen stellen ein anspruchvolles messtechnisches Problem dar, für das es noch keine zufriedenstellende Lösung gibt.

5.2 Untersuchungsmaterial

Für die umfassenden Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von Werk- und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wurden 42 verschiedene Rohstoffe und Fertigprodukte verwendet. Diese lagen als Schüttgüter in Form von Flocken, Spänen, Fasern oder Granulat oder als Feststoffe in Form von Matten oder Platten vor. Die Materialpalette reichte von exotischen Rohstoffen wie dem Mark des Topinamburs bis zu den klassischen Dämmstoffen Wolle und Holzfasern (siehe folgende Zusammenstellung).

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen:

Cellulose - Flocken

Cellulose - Platten

Nadelholz - Späne

Nadelholz - Faserplatten

Flachs - Faserplatten

Hanf - Fasermatten

Hanf - Fasern

Baumwolle - Matten

Balsa - Vollholzplatten

Getreide - Granulat

Seegras - Schüttungen

Korkschrot - Schüttungen

Topinambur-Schüttungen

Kork - Platten

Kokos - Matten

Schafwolle - Matten

Referenzmaterialien:

Mineralwolle - Fasermatten

Mineral - Faserplatten

Glaswolle - Matten

Polystyrol - Hartschaumplatten (geschlossen-porig)

Mineralische – Ausgleichsschüttungen

5.3 Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Zurzeit wird die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen standardmäßig mit dem so genannten Ein- oder Zwei- Plattenverfahren nach ISO 8302 und/oder DIN EN 12939 ermittelt. Bei diesen Verfahren sind Probegrößen von mehr als 500 mm Kantenlänge, Probendicken von mehr als 5 mm und Messzeiten von einigen Stunden erforderlich. Insbesondere die langen Messzeiten schließen dieses Verfahren für eine schnelle industrielle Prüfung der genannten thermischen Transportparameter aus. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Materialfeuchte liefert zudem unzuverlässige Werte, da sich unter dem Einfluss des angelegten Temperaturgradienten über die stundenlange Messzeit auch die Feuchteverteilung im Material ändert.

5.3.1 Zweiplatten-Verfahren

Stationäre Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattenverfahren nach DIN EN 12939 erfordern Probegrößen von mehr als 500 mm Kantenlänge, Dicken von mehr als 5 mm und Messzeiten von einigen Stunden. Das Plattengerät ist nur bedingt geeignet für inhomogene Proben, wie z. B. Mauerwerk. Außerdem ist die Anwendung dieses Prüfverfahrens im Allgemeinen auf Stoffe mit einer Wärmeleitfähigkeit kleiner als 2 W/(m*K) beschränkt.

Die Wärmeleitfähigkeit wird jeweils an zwei Proben ermittelt, die vor der Messung getrocknet werden müssen. Anschließend wird aus diesem Messwert mit einem genormten Zuschlagswert der Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Für Dämmstoffe oder Plattenwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind diese Zuschlagswerte häufig zu hoch. Zum Teil sind diese Materialien nicht in der Norm aufgeführt, so dass, ohne weitere Nachweise, ein sehr hoher (Sicherheits-)Zuschlag angesetzt wird.

Die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dieser Norm beträgt ± 5 % unter der Voraussetzung, dass alle messtechnischen Regeln sorgfältig eingehalten werden.

5.3.2 Einplatten-Verfahren

Dieses Messverfahren wird grundsätzlich in der DIN 52 612-1 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät“ beschrieben (Bild 112). Es ist für Proben mit quadratischer oder kreisförmiger Grundfläche geeignet. Das Gerät besteht aus der Wärmequelle mit Heizplatte, Heizring und Gegenheizplatte, dem Schutzring, der das Probenvolumen umschließt, sowie der als Wärmesenke dienenden Kühlplatte. Das Plattensystem befindet sich in einem evakuierbaren Gehäuse und lässt sich von außen mit einem einstellbaren Druck zwischen 0,1 N/cm² und 2 N/cm^2 belasten. Die Messung der Oberflächentemperaturen der Probe erfolgt indirekt mit Temperaturfühlern in Bohrungen in der Heiz- und der Kühlplatte.

Die Grund- und Deckflächen der als homogen vorausgesetzten Probe müssen mit jeweils einer Schicht eines transparenten Schutzlacks versiegelt werden, deren Dicke höchstens 10 µm beträgt. Die beiden Deckflächen dürfen nur um jeweils höchstens 10 µm von der Ebenheit und um höchstens 15 µm von der Parallelität abweichen.

Die Probe wird mit Ausgleichsschichten aus Silikonöl zwischen Heiz- und Kühlplatte eingebettet. Nach dem Zusammenbau wird die Luft im Gerät durch trockenen Stickstoff ersetzt. Die Temperierung des Gerätes erfolgt so, dass sich eine Temperaturdifferenz zwischen der Heiz- und Kühlplatte von 5 K einstellt. Die Messung erfolgt im stationären Zustand. Dieser Zustand gilt als erreicht, wenn die Temperatur über eine Dauer von mindestens 20 min. um nicht mehr als 0,01 K von ihrem Sollwert abweicht. Danach wird aus den erhaltenen Messwerten sowie der Probenfläche und deren Dicke die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet.

Diese Prozedur wird nach jeweils 20 min mindestens zweimal wiederholt, um sicherzustellen, dass die Wiederholstreuung des Messwertes kleiner als 0,01 % ist.

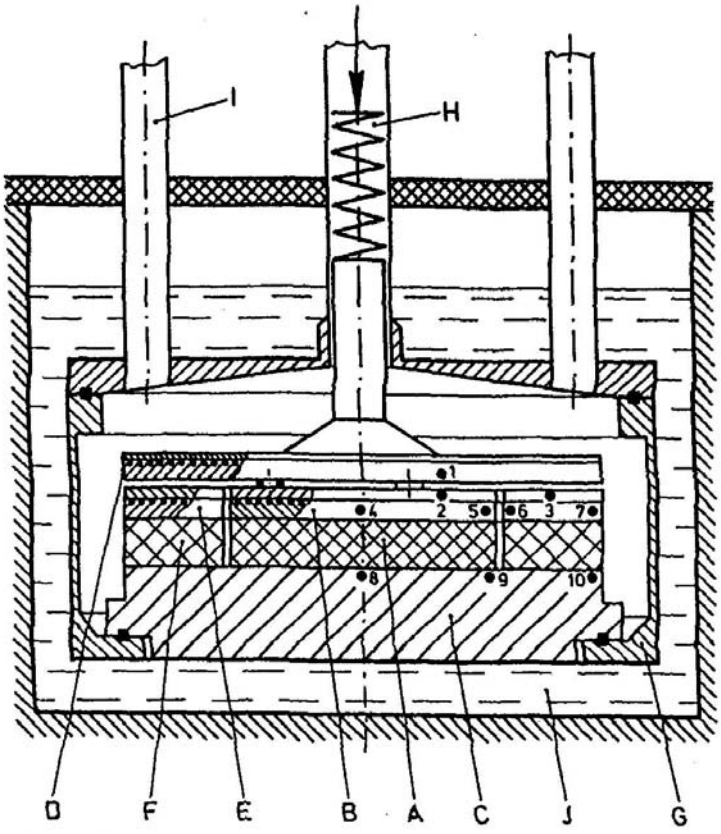


Bild: Schematischer Aufbau eines Einplattengeräts:

A Probe
B Heizplatte
C Kühlplatte
D Gegenheizplatte
E Heizring
F Schutzring
G Gehäuse
H Druckstempel
I Durchführungen
J Flüssigkeitsbad

Bild 112: Prinzipskizze des Einplatten - Verfahrens

5.4 Instationäre Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Am WKI wurde in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), ein neues Verfahren getestet, bei dem die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Dämmstoffen in Abhängigkeit von Dichte und Materialfeuchte bestimmt werden kann. Diese sehr schnell arbeitende Methode, das so genannte Transient Hot Strip[1] (THS) oder, als dessen Weiterentwicklung, das Transient Hot Bridge (THB) Verfahren beruht im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren auf einem instationären (transienten) Prinzip. Das Verfahren kann sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Temperaturleitfähigkeit relativ kleiner (80 mm x 30 mm) aber auch sehr großer Probekörper innerhalb weniger Minuten messen. Gerade wegen dieser kurzen Messzeiten ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit auch in Abhängigkeit von der Materialfeuchte möglich, ohne dass der Messprozess diese signifikant verändert.

Bei dem erst genannten Messverfahren (THS) wird ein sehr dünner (0,005 mm) Metallstreifen (vorzugsweise aus Platin oder Nickel) zwischen zwei quaderförmige Proben geklemmt und in temperierter Umgebung zunächst auf die konstante Messtemperatur gebracht. Der Streifen wird dann für die Dauer von einigen Minuten mit einem elektrischen Heizstrom erwärmt. Während dieser Zeit wird sein temperaturabhängiger Spannungsabfall als Maß für die gesuchten Transportgrößen simultan registriert. Damit dient der Streifen gleichzeitig als Wärmequelle und Widerstandsthermometer. Abschließend können der im Rechner gespeicherte zeitabhängige Spannungsverlauf analysiert und die beiden Leitwerte (Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit) berechnet werden.

Die Weiterentwicklung dieses Sensors nutzt statt nur eines Heizstreifens vier parallele Streifen in einer Wheatstonschen Brückenschaltung. Damit werden wesentliche Störgrößen kompensiert.

5.4.1 Hardware - Messstreifen:

Für die Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wurden in der PTB verschiedene Bauarten eines THB-Streifensensors entwickelt und erprobt. Für die beiden in Bild 113 dargestellten Typen wurden Patentanmeldungen1 eingereicht.

Die Unsicherheitsanalyse und der experimentelle Vergleich mit anderen Messverfahren ergaben, dass eine Messunsicherheit unter 3 % erreicht werden kann[4-7]. Dieser Wert entspricht demjenigen von Plattengeräten nach einschlägigen Normen und ist somit als geeignet anzusehen für die Untersuchung von Dämmstoffen. Der individuelle Einfluss des Probematerials auf die Messunsicherheit kann jedoch nur im Zuge dieses Projektes ermittelt werden.

Die Sensoren werden nach dem gleichen Fertigungsverfahren wie übliche Heizfolien hergestellt. Sie sind für praktische Anwendungen ausreichend mechanisch und chemisch robust sowie temperaturbeständig bis 250 °C. Zahlreiche Messungen an verschiedenen homogenen Proben, unter anderem an den gängigen Dämmstoffen, wurden mit einem Brückensensor in einem Thermostat bei Temperaturen von –60 °C bis 100 °C durchgeführt.

[1] Patent DE 10323827 A1

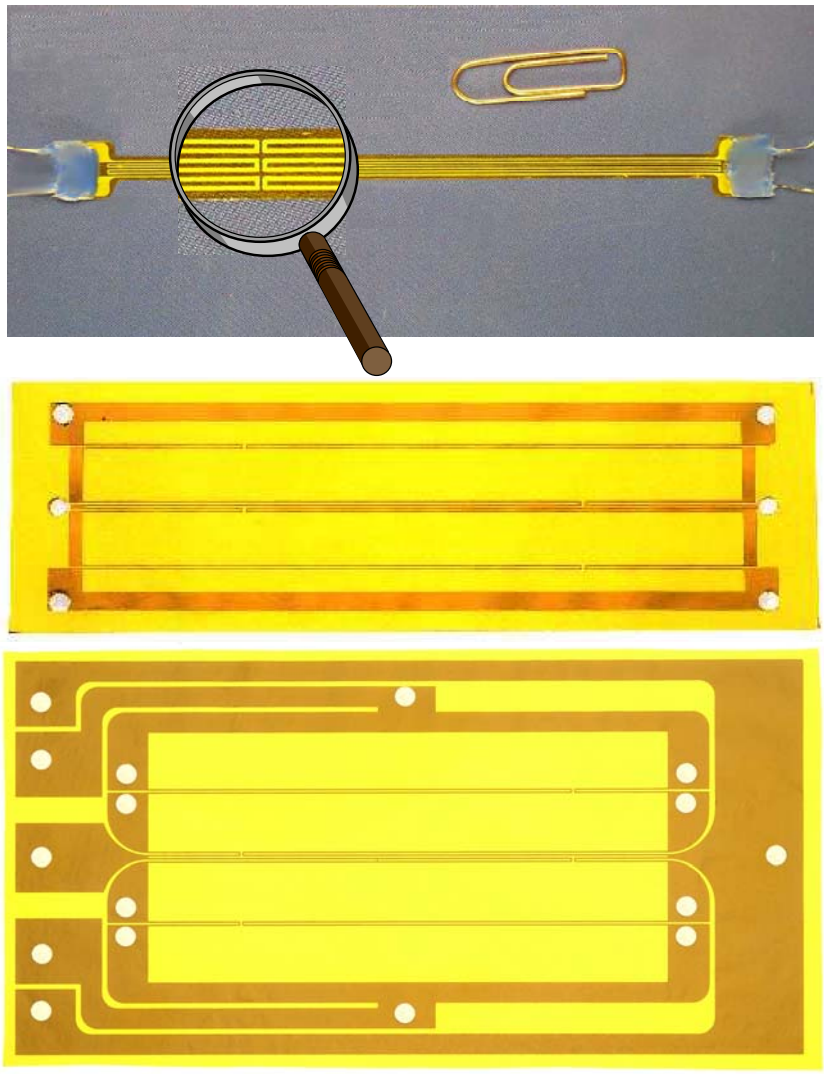


Bild 113: Tandem-Sensor (oben), Brückensensor (2004, Mitte) und neuester Brückensensor (2006, unten).

5.4.2 Hardware - Messeinrichtung:

Die THS/THB - Messeinrichtung besteht im Wesentlichen, wie in Bild 114 zu erkennen ist, aus einem Probenhalter (2) und einem der oben genannten Sensoren (1), vorzugsweise dem THB-Brückensensor. Diese Anordnung wurde weiterentwickelt, so dass ein für alle Dämmstoffe nutzbarer Aufbau aus Computer und hochgenauen Strom- und Spannungsmodulen entstand. Speziell für die Untersuchung von Schüttdämmstoffen wurde eine Messzelle aufgebaut, die auch eine definierte Verdichtung dieser Materialien ermöglicht (siehe Bild 115). Damit kann die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit nicht nur von der Materialfeuchte, sondern darüber hinaus auch von der Schüttgutdichte gemessen werden[7].

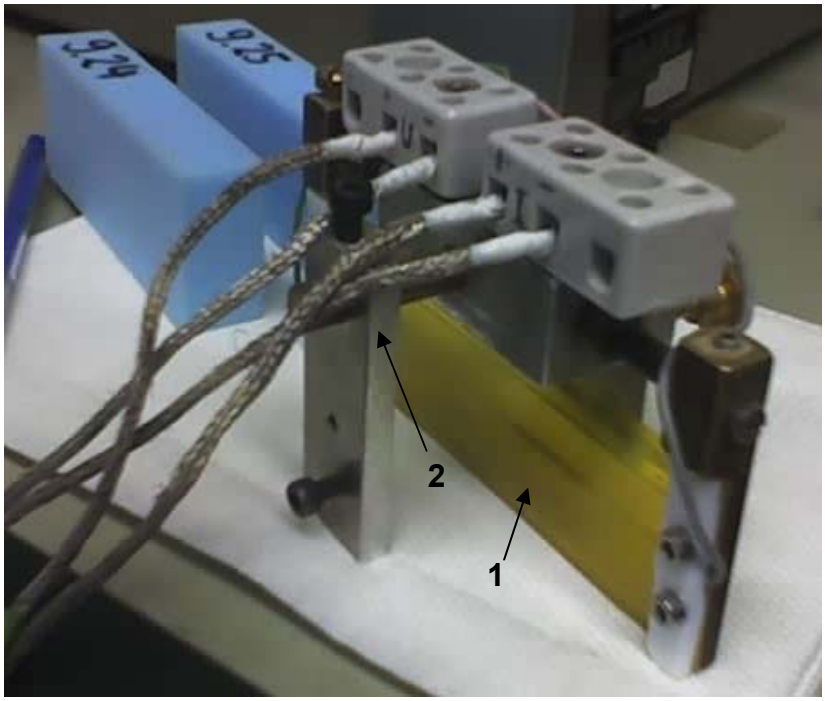


Bild 114: Probenhalter (2) mit dem gespannten Brückensensor (1) der PTB.

Bild 115: Foto der THS/THB - Messeinrichtung des WKI mit Messzelle (links), Computer, hochgenauer Stromquelle und Nanovoltmeter.

Die Messzelle ist auf Basis eines Zentrierschraubstocks aufgebaut. Beim Schließen übt dieser beidseitig den gleichen Druck auf das Untersuchungsmaterial aus. Der in der Mitte der Halterung flexibel aufgespannte Sensor wird somit von beiden Seiten mit dem gleichen Anpressdruck be-

aufschlagt. Um neben festen Platten und Matten auch Schüttgüter vermessen zu können, ist um den Sensor herum ein Plexiglasbehälter mit einem Volumen von ca. 2,5 L angebracht. Durch das Zusammenfahren der beiden Spannbacken werden Schüttungen definiert verdichtet. Auf diese Weise lässt sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte bestimmen[2-3].

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchtebeladener Stoffe ist ebenfalls möglich. Hierzu wird die Messeinrichtung in einem Klimaraum aufgebaut in dem zuvor das Material bis zur Ausgleichsfeuchte gelagert wurde. Durch diese Vor-Ort-Messung wird vermieden, dass die Ergebnisse möglicherweise durch den Transport des Materials beeinflusst werden.

5.5 Optimierung des Messinstruments

Der zu Beginn der Untersuchungen verfügbare Messaufbau nach dem Heizstreifenverfahren (THS) wurde sowohl hinsichtlich seiner Hardware als auch der Software grundlegend verbessert.

Die ursprüngliche Zielvorstellung „Weiterentwicklung und Optimierung des bestehenden THS-Geräts -in Hardware und Software-“ wurde wie folgt weiter präzisiert: Der THS-Messaufbau soll zu einem Messinstrument weiterentwickelt werden, das zuverlässige Messwerte der Wärmeleitfähigkeit mit möglichst geringer Unsicherheit liefert. Für Probentemperaturen bis 200 °C soll der Messbereich zwischen 0,02 $Wm^{-1}K^{-1}$ und mindestens 10 $Wm^{-1}K^{-1}$ liegen, wobei die Unsicherheit typisch unter 5 % betragen soll. Insbesondere sollen auch feuchtebeladene Feststoff- und Schüttgutproben untersuchbar sein, ohne dass sich der ursprüngliche Feuchtegehalt während der Messung signifikant verändern kann. Schüttgüter sollen in Abhängigkeit von ihrer Dichte zu messen sein. Die hierzu insgesamt notwendige Optimierung sowohl der Hardware des Instruments als auch seiner Software soll unter weitgehender Beibehaltung des einfachen robusten Aufbaus, der leichten Bedienbarkeit und der kurzen Messzeiten erfolgen.

5.5.1 Hardware – Heizstreifen

Die in einer Bestandsanalyse aufgedeckten Schwachstellen des THS-Aufbaus hinsichtlich der Messunsicherheit betreffen überwiegend das wesentliche Bauelement, den Heizstreifen. Der erste Schritt zu dessen Optimierung erbrachte den in Bild 113 dargestellten „Tandem - Sensor“. Entsprechend seinem Namen ist dieser Heizstreifen in zwei Segmente geteilt, die sich nur in ihren Längen unterscheiden. Zur Erhöhung des ohmschen Widerstandes sind beide Strompfade gleichartig mäandrisiert. Die zahlreichen Spalte zwischen den einzelnen Windungen der beiden Pfade sind indes noch so schmal, dass der stromdurchflossene Sensor thermisch wie ein kompakter (Nickel-) Streifen wirkt. Elektrisch hingegen wirkt dieser Sensor wie zwei getrennte Widerstandsbauelemente mit voneinander abweichenden Widerstandswerten. In eine äußere Messbrücke geschaltet, liefern die beiden Widerstände des Tandem - Sensors nach vorherigem Abgleich während der Messung ein Offset - freies Ausgangssignal für die Wärmeleitfähigkeit der den Sensor umgebenden Probe. Das Ausgangssignal ist frei von jeglichen Störungen infolge des sogenannten Endeffekts, da die asymmetrische Zweiteilung des Streifens für die wirkungsvolle Kompensation einer ungleichförmigen Temperaturverteilung sorgt.

Der Tandem - Sensor als aktives Brücken-Halbglied verbessert die elektrische Empfindlichkeit des Messaufbaus um etwa drei Größenordnungen. Damit kann auf kostspielige Nanovoltmeter zur Aufzeichnung des Ausgangssignals verzichtet werden; ein Mikrovoltmeter genügt bereits den elektrischen Anforderungen. Die „Kapselung“ des Heizstreifens in einer flexiblen Kaptonfolie macht ihn weitgehend unempfindlich gegen mechanische Belastungen beim Probenwechsel. Eine Messabweichungsanalyse[8] zeigt, dass das Messergebnis nicht signifikant durch die Kaptonfolien beeinflusst wird, wenn diese hinreichend dünn sind (< 30 µm). Der Tandem - Sensor verbessert die Unsicherheitsbilanz eines THS/THB - Instruments insgesamt um etwa 2% auf typisch 3%.

Der Tandem - Sensor ist inzwischen patentiert worden. Ein bekannter schwedischer Hersteller von Wärmeleitfähigkeitsmessgeräten hat die Lizenz erworben und bietet bereits ein entsprechendes Messgerät an.

Verglichen mit dem ursprünglichen THS - Aufbau ist nun allerdings ein Offset - Abgleich der äußeren Messbrücke vor Beginn jedes Experiments erforderlich. Ferner ist der störende Einfluss von Thermospannungen (s. o.) noch nicht beseitigt. Diese beiden Nachteile des Tandem - Sensors wurden mit dem zweiten Entwicklungsschritt eliminiert:

Basierend auf dem grundlegenden Tandem - Konzept wurde durch die inzwischen ebenfalls patentierte Anordnung von vier parallelen Heizstreifen die gesamte Messbrücke in einem Sensor realisiert (siehe Bild 113). Dieser transient-hot-bridge (THB-) Sensor benötigt keine externen Widerstandsbauelemente mehr. Wegen seines symmetrischen elektrischen Aufbaus entfällt auch der Abgleich[4]. Der THB - Sensor vereinigt weiterhin alle oben genannten Vorteile des Tandem - Sensors. Darüber hinaus bietet er ein nahezu thermospannungsfreies Ausgangssignal, da die gesamte Messbrücke vom Probematerial umgeben ist. Eine erste Unsicherheitsanalyse ergab einen Wert von typisch 2 % bis 1,5 % [8].

Beide Sensortypen sind im Projektzeitraum eingehenden Prüfungen an verschiedenen homogenen Materialien bei Temperaturen zwischen –60 °C und 100 °C unterzogen worden. Insbesondere wurden auch Vergleichsmessungen an Referenzmaterialien durchgeführt. Letztere haben die theoretisch ermittelten Messunsicherheiten experimentell voll bestätigt.

Für Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen eignen sich prinzipiell beide neuen Bauformen des Streifensensors. Die zugehörigen Messunsicherheiten können indes über denen der Referenzmaterialien liegen, da die materialabhängige Komponente der Unsicherheit hier gewöhnlich einen deutlich höheren Beitrag liefert. Letzterer ist durch sorgfältige Probenpräparation zu minimieren und dann entsprechend dem untersuchten Stoff jeweils gesondert abzuschätzen. Dann erreichen beide vorgestellten Sensoren den für gute Plattengeräte typischen Messunsicherheitsbereich. Im Gegensatz zu den genannten stationären Geräten bieten die Heizstreifen - Sensoren weiterhin den einfachen, kostengünstigen Aufbau und weitaus geringere Messzeiten.

Für die Untersuchungen im Rahmen des beschriebenen Vorhabens wurde ausschließlich der THB - Sensor verwendet.

5.6 Softwareentwicklung

5.6.1 Messdatenaufnahme

Die bereits an der PTB und am WKI vorhandene Software wurde erweitert und optimiert. Nach dem Bestücken der Messzelle mit Untersuchungsmaterial und nach Eingabe einiger weniger Experimentparameter wird die Messung durch Knopfdruck gestartet und nach einigen Minuten automatisch beendet. In Bild 116 ist die Software-Oberfläche für die Datenerfassung zu sehen, wobei die Daten auf dem Bildschirm tatsächlich ständig aktualisiert werden.

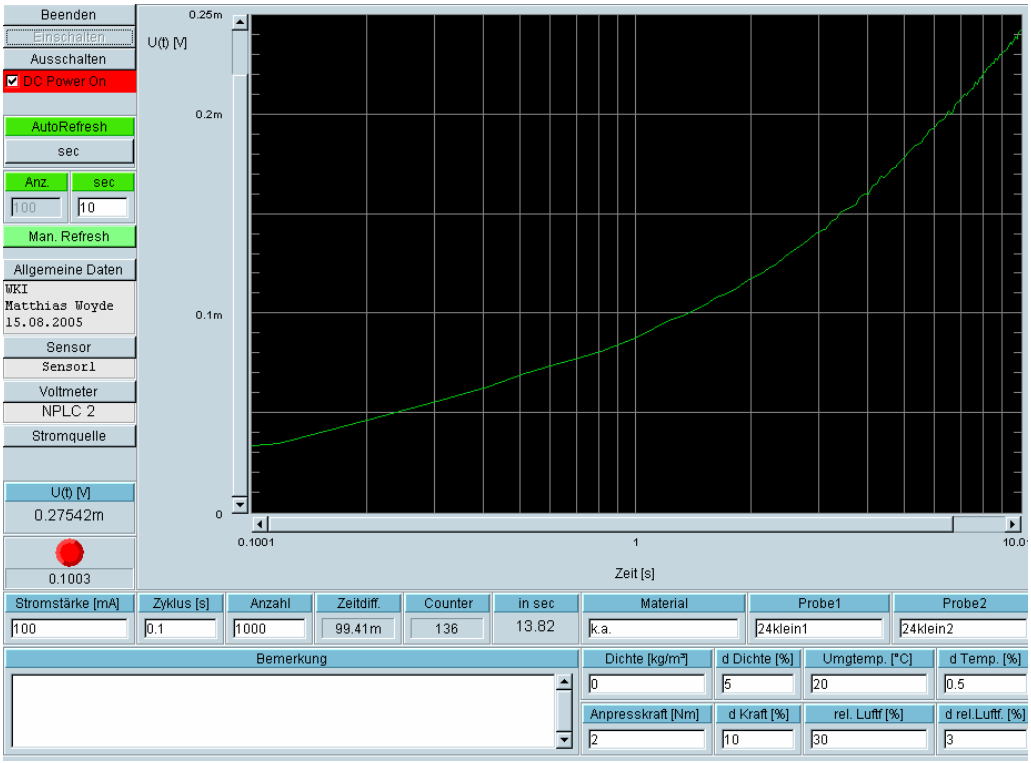


Bild 116: Datenerfassungssoftware am WKI zur Online – Beobachtung der aufgenommenen Messdatenwerte

5.6.2 Auswertungssoftware

Die Auswertungssoftware soll zwei wichtige Probleme lösen. Als erstes soll das bestehende halbautomatische auf ein vollautomatisches Auswertungsverfahren umgestellt werden. Für das vollautomatische Auswertungsprogramm wurde ein Algorithmus entwickelt und durch umfangreiche Vergleichsmessungen an Referenzstoffen überprüft.

Darüber hinaus soll nicht nur ein Messwert für die Wärmeleitfähigkeit berechnet, sondern auch nach den internationalen GUM - Regeln2 die Messunsicherheit geliefert werden[1]. Mit der Anwendung eines Brückensensors (siehe Bild 113) wurde dies zum ersten Mal möglich[4-7].

Die Oberfläche der Auswertesoftware ist unter Excel programmiert worden. Sie ist in Bild 117 als Screenshot zu sehen. Die Auswertung erfolgt

[2] Guide for the Expression of Uncertainty in Measurements

automatisch und wird sowohl graphisch (Bild 118) als auch rechnerisch im Datenblatt (Bild 117, roter Kreis) dargestellt.

Erste vergleichende Messungen mit dem THB- und dem Einplattenverfahren[3] wurden an der PTB für einige Dämmstoffe bereits durchgeführt (siehe Anlage 1). Hierfür wurden von jedem Material zwei Prüfkörper (Durchmesser 100 mm) für das Plattenverfahren und jeweils zwölf Prüfkörper (100 mm x 50 mm x 50 mm) für das THB-Verfahren präpariert.

Die Probekörper für das THB-Verfahren wurden unterschiedlich klimatisiert und für jeden der vier unten aufgeführten Klimawerte paarweise gemessen. Folgende Klimate sind eingestellt worden:

- 20 °C / 30 % rel. Luftfeuchte
- 20 °C / 50 % rel. Luftfeuchte
- 20 °C / 70 % rel. Luftfeuchte
- 20 °C / 85 % rel. Luftfeuchte.

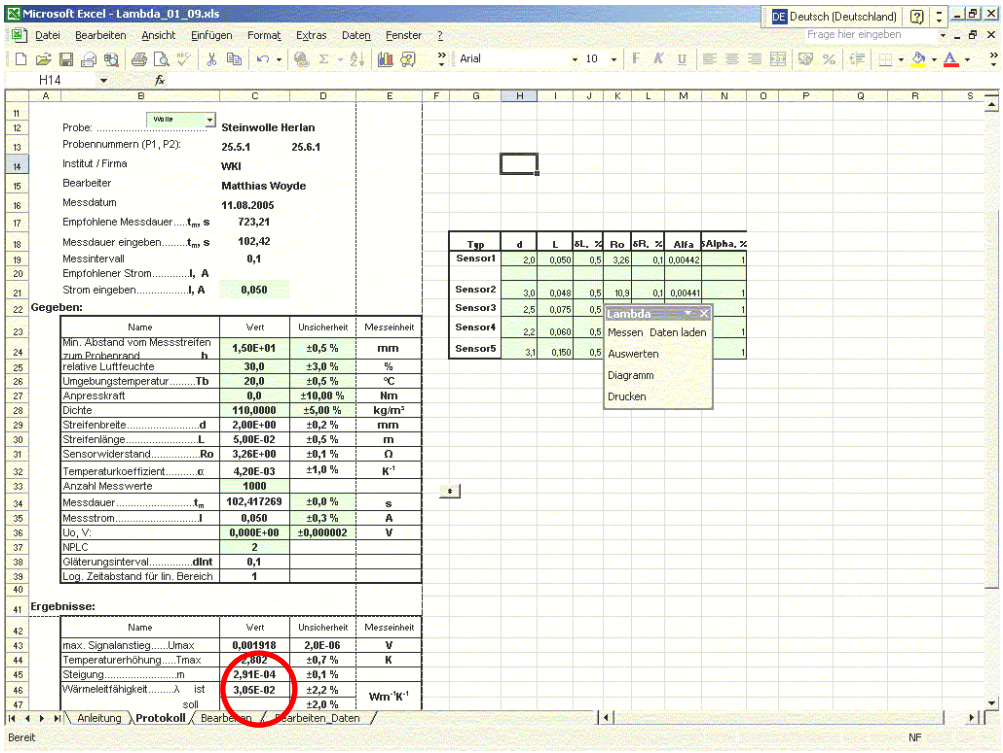


Bild 117: Auswertesoftware der PTB, die unter Excel programmiert wurde. Die ausgewertete Wärmeleitfähigkeit (roter Kreis) wird in das Blatt eingetragen.

[3] Referenzwerkstoffe waren PMMA, BK7, resin bonded fiber board, IRMM-440

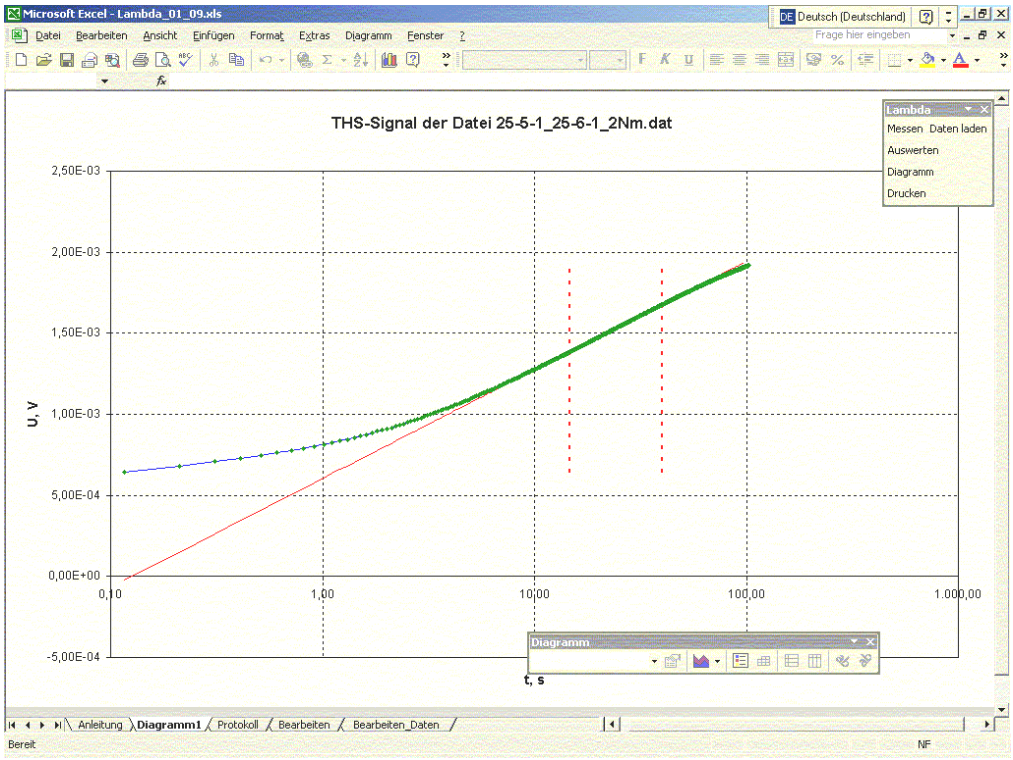


Bild 118: Graphische Darstellung einer ausgewerteten Datenserie.

Die Ergebnisse der Messungen bei den entsprechenden Luftfeuchten und damit verbundenen Materialfeuchten sind in der Anlage 1 im Einzelnen und in Anlage 2 zusammengefasst dargestellt.

5.7 Voruntersuchungen

5.7.1 Rohdichtebestimmung von festen Untersuchungsmaterialien

Die Rohdichteprofile verschiedener fester Untersuchungsmaterialien sind mit einer Gammasonde des WKI (Bild 119) radiometrisch vermessen und aufgezeichnet worden. Die Ergebnisse, die in Anlage 4 zu finden sind, dienen dazu, den Einfluss der Dichteprofile auf die Wärmeleitfähigkeit zu überprüfen.

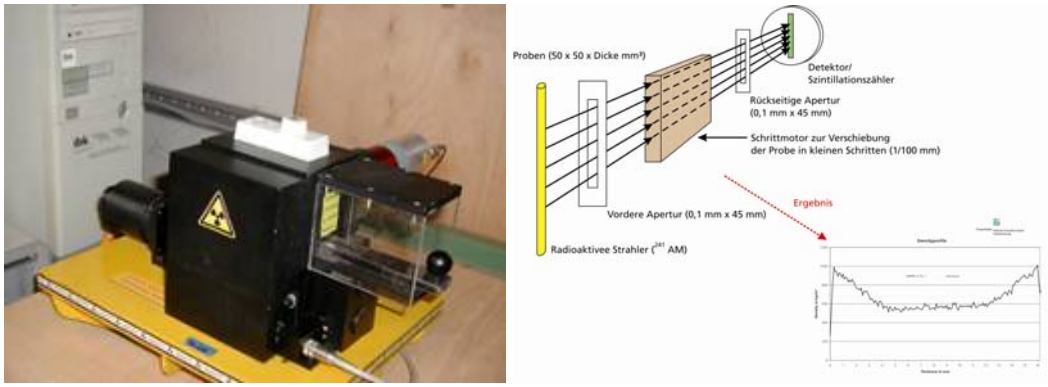


Bild 119: Foto und schematischer Aufbau eines Gerätes zur radiometrischen Dichtebestimmung.

Die festen Materialien Nr. 20, Nr. 21 und Nr. 22 zeigen ein stark ausgeprägtes Rohdichteprofil. Sie wurden daher in bis zu fünf ähnlich dichte Teilbereiche zerlegt (a = Deckschicht, b = Mittelschicht, vorn, c = Mittelschicht, Mitte, d = Mittelschicht, hinten und e = Deckschicht, hinten), die jeweils separat gemessen wurden. Die genaue Aufteilung und die zugehörigen Messwerte sind in Anlage 1 zu finden.

Die Dichte der Schüttgüter wurde, soweit die Materialien dies zuließen, im Probenhalter durch Reduzierung ihres Volumens eingestellt. Die Dichtevariation in Abhängigkeit von der Volumengröße ist in Anlage 5 für einige komprimierbare Untersuchungsmaterialien dargestellt.

5.7.2 Materialfeuchten

Um unerwünschte Störeinflüsse auszuschließen wurden, wie bereits erwähnt, alle THB-Messungen in genau dem Klima durchgeführt, in welchem die Prüfkörper konditioniert wurden. Ausnahmslos alle Probekörper wurden vor ihrer Messung so lange in dem Prüfklima aufbewahrt, bis sie die Ausgleichsfeuchte erreicht hatten, um sie dann paarweise zu vermessen.

Darüber hinaus wurde für jedes der oben beschriebenen Klimate auch die Materialfeuchte der Prüfkörper nach DIN 52 183 gravimetrisch bestimmt4.

Die Abhängigkeit der Materialfeuchte von der Feuchte der umgebenden Luft wurde graphisch dargestellt und ist in Anlage 2 zu finden. Um die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Materialfeuchte zu ermitteln, wurden diese Werte graphisch gegeneinander aufgetragen. Die Einzelergebnisse sind in Anlage 1 (einzeln für jeden Prüfkörper) oder in der Übersicht in Anlage 3 dargestellt.

5.7.3 Störeinflüsse

Die Untersuchung auf potentielle Störeinflüsse bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte vor Beginn der eigentlichen Messungen. Hierzu gehörten folgende Fragen die mit entsprechenden Versuchen überprüft wurden:

- Einfluss elektromagnetischer Felder (EMV) auf die Messung,
- Einfluss von Strom- und Spannungsschwankungen des Netzes auf die
- Messung,
- Einfluss der Luftfeuchte auf die elektrischen Geräte,
- Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen,
- Einfluss unterschiedlicher Heizströme,
- Wiederholbarkeit des Anpressdrucks,
- Oberflächenbeschaffenheit des Probematerials,
- Langzeitverhalten.

4 DIN 52183, Ausgabe:1977-11 Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes

5.7.3.1 Elektromagnetische Felder

Um den potentiellen Einfluss elektro-magnetischer Felder auf die Untersuchungen zu überprüfen, wurden THB - Messungen mit Cellulose-Platten (Material 3) mit bekannter Wärmeleitfähigkeit als Referenz durchgeführt. Hierbei wurden wiederholt große Kühlaggregate neben den Messplatz gestellt, auch wurde in einem mit Edelstahl ausgekleideten Raum in einem separat stehenden Haus gemessen. Es konnte kein messbarer Einfluss elektro-magnetischer Felder auf die Messung gefunden werden.

5.7.3.2 Strom- und Spannungsschwankungen

Die oben beschriebenen Messungen wurden einmal direkt am Stromnetz, dann mit vorgeschaltetem Netzfilter und schließlich mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung USV (völlig vom Stromnetz abgekoppelt) durchgeführt.

Dabei zeigte sich, dass größere Schwankungen im Stromnetz durchaus eine Auswirkung auf das Messergebnis haben, diese aber bereits durch „gute“ Netzfilter weitgehend beseitigt werden können. Durch das Anschließen aller Geräte an eine USV ließ sich der Resteinfluss von Netzschwankungen völlig ausschließen. Da die begrenzte Kapazität der USV aber ein kontinuierliches Arbeiten über längere Zeit verhindert, wurde für alle weiteren Versuche nur das Netzfilter benutzt. Insbesondere ist in EMV - kritischer Umgebung darauf zu achten, dass der Rechner sich nicht an derselben Netzsteckdose wie das Messgerät befindet, denn hierdurch würde der größte Teil der Störungen übertragen (Rückwirkungen des Rechner-Schaltnetzteils).

5.7.3.3 Luftfeuchte

Der Einfluss erhöhter Luftfeuchte - insbesondere einer möglichen Wasserkondensation bei 85 % rel. Luftfeuchte (Taupunkt) - auf die elektrischen Geräte ist als weiterer Störfaktor denkbar. Hierzu kam es jedoch nicht, da die Geräte nach einer kurzen Einlaufphase selbst so viel Wärme produzierten, dass es zu keiner Unterschreitung des Taupunkts kam. Bei kleinen Klimakammern und ungenügender Feuchteregelung darf der Einfluss der warmen Geräte auf das eingestellte Klima aber nicht vernachlässigt werden.

5.7.3.4 Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen

Zur Bestimmung des Ausmaßes der Annäherung zwischen den Ergebnissen aufeinander folgender Messungen derselben Messgröße ist zwischen der Wiederholbarkeit von Messungen und ihrer Reproduzierbarkeit zu unterscheiden. Hier wurde insbesondere untersucht, welchen Einfluss ein Aus- und Wiedereinbau derselben Probe hat.

Bleibt das Material für Untersuchungen der Wiederholbarkeit zwischen den aufeinander folgenden Messungen im Probenhalter eingespannt, so sind nur geringfügige Unterschiede in den Einzelresultaten der Wärmeleitfähigkeit zu erkennen (< 0,001 W/(mK)). Bei derartigen Messreihen ist wichtig, sorgfältig darauf zu achten, dass zwischen zwei aufeinander folgenden Einzelmessungen genügend Zeit bleibt (je nach Wärmekapazität der Probe

und Umgebungstemperatur 10 – 30 min), dass das Material sich thermisch wieder mit der Umgebung ausgleicht.

Wird das Material zwischen den Messungen aus der Halterung genommen, neu eingespannt und wieder gemessen, so erhält man bei den untersuchten anisotropen Untersuchungsmaterialien Messwerte, die ebenso variieren können wie solche Probekörper, die aus verschiedenen Bereichen einer Platte entnommen wurden. Die ermittelten Reproduzierbarkeiten der Wärmeleitfähigkeit korrelieren mit dem Ausmaß der Inhomogenitäten des Materials.

5.7.3.5 Wahl des Heizstroms

Der Einfluss unterschiedlicher Heizströme auf den Messwert kann beträchtlich sein und muss für so unterschiedliche Materialien wie z. B. Glas, Metall und Dämmstoff vorher ermittelt werden ($\Delta T \leq 2$ K). So kann, abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Probe, bei dem Vergleichsglas BK 7 mit 400 mA gemessen werden, bei Metall mit Strömen zwischen 550 – 1000 mA und bei Dämmstoffen mit maximal 200 mA.

5.7.3.6 Wiederholbarkeit des Anpressdrucks

Der Anpressdruck des festen Probematerials an den Sensor wird über einen Drehmomentschlüssel definiert eingestellt (siehe Bild 120). Mit kalibrierten Druckmessdosen wurde die Wiederholbarkeit des Anpressdrucks sichergestellt. Alle THB - Messungen an festen Materialien wurden mit einem Anpressdruck von 3 Nm durchgeführt.

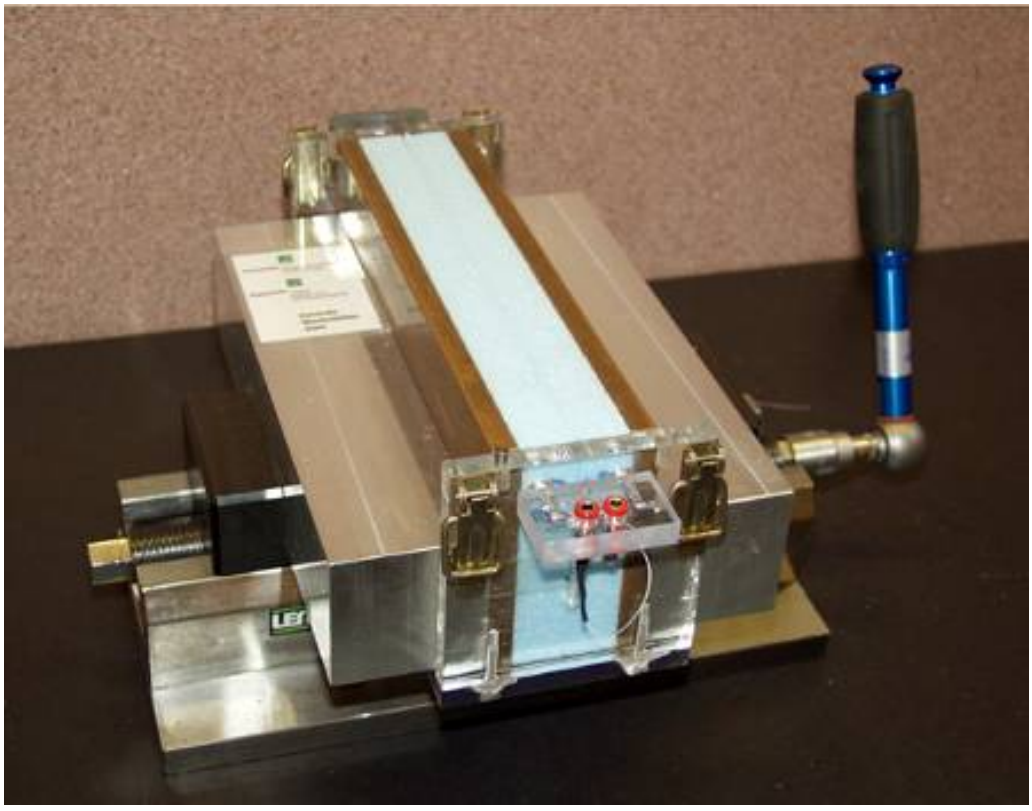


Bild 120: Versuchsaufbau mit eingespannter Probe aus Polystyrol. Der Drehmomentschlüssel (rechts) gewährleistet einen definierten Anpressdruck.

5.7.3.7 Oberflächenbeschaffenheit

Raue und poröse Oberflächen von Probematerialien sowie lokale Lufteinschlüsse dicht unter der Messoberfläche können die Messung der Wärmeleitfähigkeit teils empfindlich stören (z. B. Baumwoll-Matte, Material Nr. 8).

Grobkörniges und sperriges Material, das sich nicht gut an den Sensor anschmiegt (z. B. Nadelholz-Späne, Materialien Nr. 2 und Nr. 41) und sehr starres Material, das sich in den Bereichen der Lötpunkte nicht komplett an den Sensor drücken lässt, ist vor einer Messung zu behandeln. Im letzteren Fall können nur deutlich kleinere Prüfkörper genommen werden, die zwischen die Lötstellen des Sensors passen. Dadurch wird aber die Wärme nicht nur durch den Prüfkörper geleitet, sondern ein großer Teil fließt über die Kaptonfolie des Sensors ab. Dieser Effekt konnte mit Hilfe der Thermographie zeitaufgelöst gut beobachtet werden und führte zum Design eines neuen, verbesserten Sensor-Layouts (siehe Bild 113, unten).

5.7.3.8 Langzeitverhalten

Das Langzeitverhalten einzelner Messaufgaben wurde an einer Probe über 34 Stunden lang analysiert. Ferner wurden auch Messungen mit ein und demselben Sensor über ein Jahr an verschiedensten Proben und Klimaten durchgeführt.

In allen Fällen erwies sich der THB - Sensor als zuverlässige und über Stunden konstante Sonde. Aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Stabilität lässt er sich über viele Monate nutzen. Die empfindlichen Teile des Sensors sind seine Lötpunkte, die unbedingt gegen Zug entlastet sein müssen.

5.8 Hauptuntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit

5.8.1 Durchführung

Alle Materialien wurden bis zum Erreichen des Gleichgewichts klimatisiert, so dass sich eine jeweils konstante Materialfeuchte (Ausgleichsfeuchte) einstellen konnte. Bei einer konstanten Temperatur von 20 ± 0,5 °C wurden relative Luftfeuchten von 30 ± 3 %, 50 ± 3 %, 75 ± 5 % und 85 ± 5 % eingestellt.

Alle Messungen der Wärmeleitfähigkeit wurden unmittelbar in dem vorliegenden Klima ausgeführt, insbesondere ohne störende Rückwirkungen durch die Erwärmung der Geräte oder durch den Bediener (siehe auch Störeinflüsse Kap 5.7.3.3).

Für die Untersuchungen wurden jeweils definiert abgemessene und abgewogene Probenmengen gleichmäßig verteilt auf beiden Seiten des Sensors platziert. Feste Stoffe sowie nicht komprimierbare Schüttgüter wurden mit Hilfe des Drehmomentschlüssels mit einer Kraft von 3 Nm zentrisch an den Sensor angepresst (siehe Bild 120).

Komprimierbare Schüttgüter wurden zu gleichen Volumina beidseitig vom Sensor eingefüllt. Nach jeder Messung wurde für die folgende Untersuchung die Probendicke um jeweils einen Zentimeter verkleinert. Alle Ergebnisse sind für jedes einzelne Material in Anlage 1 und in der Übersicht für feste und komprimierbare Untersuchungsobjekte in Anlage 6 zu finden.

.

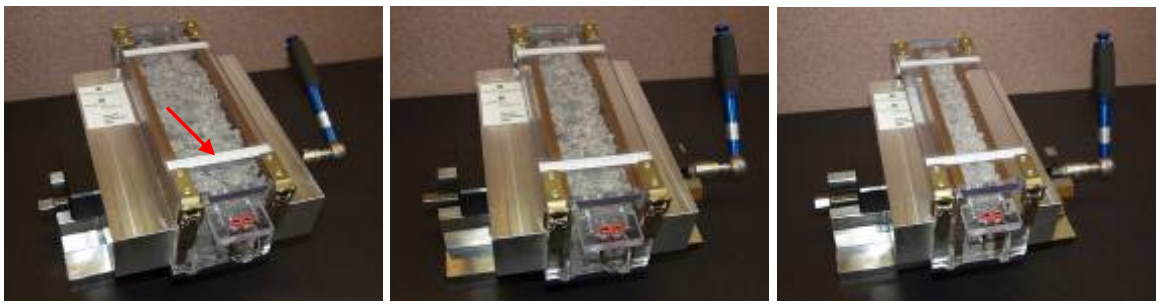


Bild 121: Versuchsaufbau mit komprimierbarem Material (Probe 1). Die Skala auf dem oberen Deckel (siehe Pfeil) sorgt für eine definiert einstellbare Dichte.

5.8.2 Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Neben der Weiterentwicklung und Verbesserung des THB - Messgerätes wurden 42 verschiedene Materialien bei vier verschiedenen relativen Luftfeuchten und zahlreichen unterschiedlichen Dichten gemessen.

5.8.2.1 Materialfeuchteabhängigkeit

Es zeigte sich (siehe Anlage 2), dass einige Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wie Nadelholz–Faserplatten (Nr. 5 und 18) und Kork (Nr. 33, 34 und 40) kaum Feuchtigkeit aufnehmen wie die nicht hygroskopischen Vergleichsmaterialien, z. B. Polystyrol (Nr. 9) oder Mineralfaserplatten (Nr. 25). Deshalb wird bei diesen Materialien die scheinbare Wärmeleitfähigkeit nicht durch die relative Luftfeuchte der Umgebung beeinträchtigt.

Materialien, die in hohem Maße Feuchtigkeit aufnehmen können (z. B. Seegras und Thermohanf (Nr. 28 und 35), die also ihre Materialfeuchte von 7 % bzw. 10 % auf über 30 % steigern, offenbaren dieses Verhalten in ihrer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit. Eine Erhöhung der Materialfeuchte z. B. des Materials 28 um 300 %, lässt die Wärmeleitfähigkeit um etwa 50 % ansteigen.

Alle Ergebnisse zur Materialfeuchteabhängigkeit sind in Anlage 1 und in der Übersicht in Anlage 3 zu finden.

5.8.2.2 Dichteabhängigkeit

Die meisten Feststoffe wurden ebenso wie die Schüttgüter, mit einem Drehmoment von 3 Nm beidseitig an den Sensor gepresst, vermessen. Feststoffe mit stark ausgeprägtem Rohdichteprofil hingegen wurden so geteilt, dass sich daraus mehrere Proben mit voneinander verschiedenen Dichten ergaben (Nr. 20, 21 und 22). Auf diese Weise war z. B. für die Probe 20 mit einer Dichtevariation zwischen gegenüberliegenden Seiten von 200 bis 450 kg/m3 eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von 0,064 auf 0,11 W/(m K), also um 72 %, zu beobachten. Details zu diesen Messungen sind in der Anlage 1 zu finden.

Die komprimierbaren Materialien (Nr. 1, 2, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 28, 29 und 39) wurden bei verschiedenen Volumina entsprechend den Abständen zwischen den Spannbacken von 10 cm, 8 cm, 6 cm und 4 cm gemessen. Beispielsweise die Hanfprobe Nr. 16 ließ sich um das 2,5-fache von 26 kg/m3 auf fast 66 kg/m3 komprimieren, wodurch sich die Wärmeleitfähigkeit (rel. Luftfeuchte 30 %) von 0,04 auf 0,077 W/(m K) fast verdoppelte.

5.8.2.3 Partikelgrößeabhängigkeit

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Größe der Partikel von Schüttgütern lässt sich bei Nadelholz-Spänen (Nr. 41) eindrucksvoll demonstrieren. Das Grundmaterial besteht aus einer Mischung verschiedener Siebfraktionen von Spänen. Bei 7,4 % Materialfeuchte hat es bei der Dichte 42 kg/m3 eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 0,048W/(m*K) während bei der Dichte 106 kg/m³ die Wärmeleitfähigkeit 0,051 W/(m K) beträgt. Der Plattenwert beträgt 0,044 W/(m*K) bei 23 °C (Anlage 1).

Eine Fraktionierung der Späne in die Größenklassen <1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, 4-5 mm und >5 mm erbrachte die in Bild 122 dargestellten unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten.

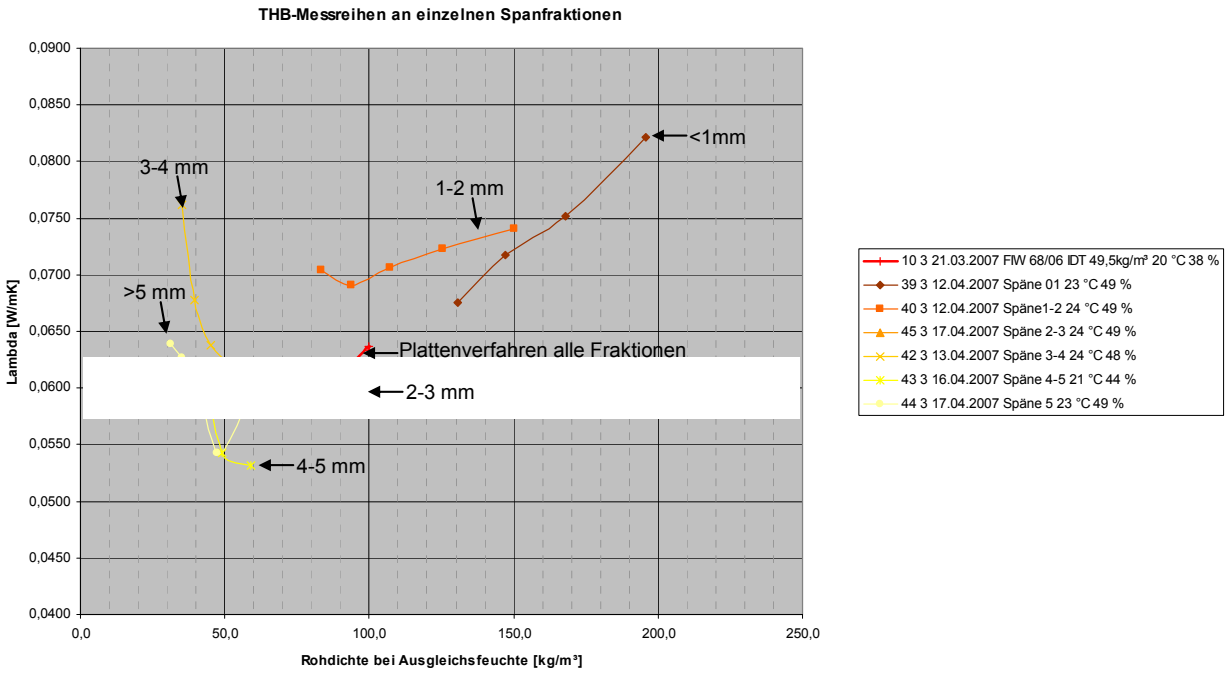


Bild 122: Wärmeleitfähigkeit von Nadelholz - Spänen für einzelne Siebfraktionen in Abhängigkeit von der Dichte.

Für Fraktionen <2 mm lässt sich der erwartete Anstieg der Wärmeleitfähigkeit deutlich nachweisen. Bei Klassen mit größeren Spänen sinkt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Dichte zunächst, um dann je nach Klasse wieder leicht anzusteigen. Die beobachtete Abnahme der scheinbaren Leitfähigkeit mit zunehmender Spangröße wird oft mit dem schwindenden Anteil der Konvektion erklärt. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden Messungen der Wärmeleitfähigkeit an der Spanfraktion 5-6mm jeweils unter Normalbedingungen und im Vakuum (0,1 mbar) durchgeführt. Der Aufbau ist in Bild 123, die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit in Bild 124 zu sehen.

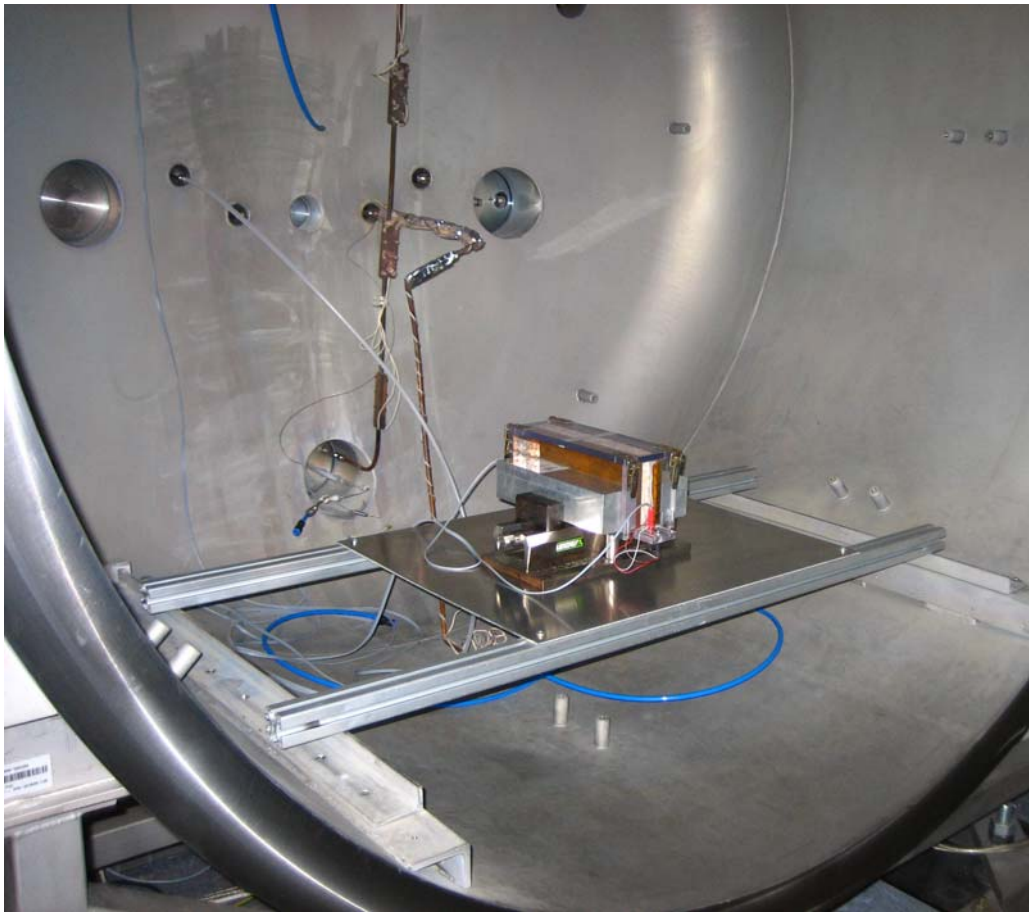


Bild 123: THB - Messgerät in einer Vakuumkammer, um den möglichen Einfluss der Konvektion auf den Messwert der Wärmeleitfähigkeit auszuschließen.

Die bessere thermische Isolierwirkung des Vakuums gegenüber der Luft ist in Bild 124 deutlich zu erkennen. Beide Kurven laufen im Übrigen fast parallel; zunächst sinkt die Wärmeleitfähigkeit nach dem ersten Verdichten und steigt danach nur unwesentlich wieder an. Aus dem (nahezu) parallelen Verlauf lässt sich der mögliche Einfluss von Konvektion ausschließen[9].

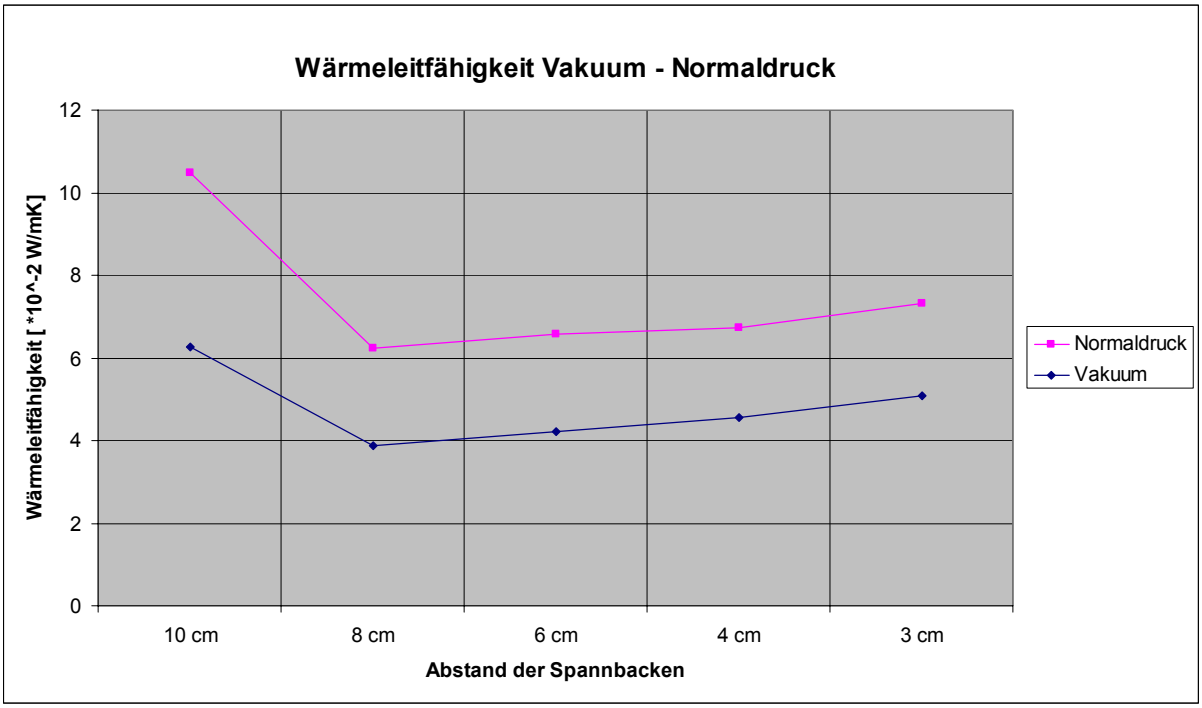


Bild 124: Wärmeleitfähigkeit von Nadelholz-Spänen unter Normalatmosphäre und im Vakuum.

5.9 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich grundsätzlich feststellen, dass mit dem weiter entwickelten THB - Messgerät sowohl an Feststoffen und Schüttgütern als auch an komprimierbaren Materialien Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit guter Reproduzierbarkeit durchführbar sind.

Der Nachweis einer Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dichte komprimierbarer Materialien ist mit Hilfe eines Zentrierschraubstocks im Messaufbau leicht möglich.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Materialfeuchte konnte für relative Luftfeuchten von 30 % bis 85 % nachgewiesen werden.

Ein Vergleich der Messergebnisse des THB - Geräts mit einerseits den entsprechenden Ergebnissen des Platteninstruments und andererseits mit den Herstellerangaben ergibt folgenden Befund (Tabelle 139):

- In drei Fällen waren die Werte von THB- und Plattenverfahren identisch
- 15-mal war jeweilige THB-Wert niedriger als der des Plattenverfahrens bzw. als die entsprechende Herstellerangabe (max. Abweichung 44 % bei mineralischer Schüttung Nr. 31)
- 20-mal war der jeweilige THB-Wert höher als beim Plattenverfahren bzw. als die entsprechende Herstellerangabe (max. Abweichung 113 % (!) bei Nadelholz-Faserplatten Nr. 19).

Tabelle 139: Vergleich der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten mit dem THB- bzw. dem Plattenverfahren sowie die Abweichungen der Messungen voneinander.

Nummer	Material	λ [W/(m*K)]	λ [W/(m*K)]	λ [W/(m*K)]	Differenzen [%]
		Herstellerangaben	THB	PTB	
1	Cellulose-Flocken	0,037	0,038	0,0437	13,0
2	Holzspäne		0,058	0,051	-13,7
3	Celluloseplatten	0,039	0,047		-20,5
4	Mineralwolleplatten	0,04	0,033	0,039	15,4
5	Nadelholz-Faserplatten	0,038	0,045		-18,4
6	Flachs-Faserplatten	0,04	0,043		-7,5
7	Hanf-Fasermatten	0,04	0,046	0,037	-24,3
8	Baumwolle-Matten	0,036	0,039		-8,3
9	Polystyrolplatten	0,033	0,027	0,031	12,9
10	Cellulose-Flocken	0,037	0,04		-8,1
11	Cellulose-Flocken	0,037	0,037		0,0
12	Cellulose-Flocken	0,037	0,039		-5,4
13	Cellulose-Flocken	0,04	0,04		0,0
14	Cellulose-Flocken		0,04		
15	Cellulose-Flocken	0,039	0,041		-5,1
16	Hanf-Fasern		0,041	0,045	8,9
17	Mineralfaser-Platten	0,04	0,031	0,039	20,5
18	Nadelholz-Faserplatten	0,049	0,081		-65,3
19	Nadelholz-Faserplatten	0,051	0,096	0,045	-113,3
20	Nadelholz-Faserplatten	0,047	0,066		-40,4
21	Nadelholz-Faserplatten		0,1/0,0906/0,076		
22	Nadelholz-Faserplatten		0,098/0,065		
23	Nadelholz-Fasermatten	0,038	0,045	0,0493	8,7
24	Balsa-Vollholzplatten	0,04	0,103	0,104	1,0
25	Mineralfaser-Platten	0,04	0,031		22,5
26	Getreidegranulat	0,064	0,075		-17,2
27	Getreidegranulat	0,047	0,061		-29,8
28	Seegras	0,045	0,043		4,4
29	Hanffasern	0,048	0,048		0,0
30	Korkschrot	0,055	0,067		-21,8
31	Min. Schüttung	0,16	0,09		43,8
32	Min. Schüttung	0,05	0,0495		1,0
33	Korkplatten	0,04	0,0373		6,8
34	Korkplatten	0,04	0,0365		8,8
35	Hanfmatten	0,04	0,0486		-21,5
36	Kokosmatten	0,045	0,0527		-17,1
37	Kokosmatten	0,045	0,051		-13,3
38	Holzfaserplatte	0,038	0,047		-23,7
39	Schafwolle	0,0442	0,038		14,0
40	Korkschüttung	0,05	0,048		4,0
41	Holzspäne	0,045	0,0475	0,041	-15,9
42	Topinambur Schüttung		0,0405		
20	THB - Wert höher als Plattenverfahren bzw. Herstellerangaben				
3	Beide Werte sind identisch				
15	THB - Wert niedriger als Plattenverfahren bzw. Herstellerangaben				

5.10 Literatur

[1] Hammerschmidt, U., Sabuga, W.: Transient Hot Strip Method: Uncertainty Assessment, International Journal of Thermophysics, Vol. 21, No. 1, 2000

[2] Meinlschmidt, P.: Schnelle Messung der Wärmeleitfähigkeit mit dem THS Verfahren, WKI-Kurzbericht Nr. 10/2002

[3] Meinlschmidt, P.: Schnelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen - Abhängigkeit von Materialfeuchte und Dichte -, WKI Jahresbericht

[4] Hammerschmidt, U; Meier, V.; Model, R.: New Transient Hot Bridge Sensor to Measure the Thermal Conductivity, in Proc. 28th Int. Therm. Cond. Conf. St.-Andrews-by-the-Sea, CDN, 26.-29.06.2005, eds. Dinwiddie, White, Mc Elroy (Lancaster, DEStech Publ.) 2006

[5] Hammerschmidt, U; Meier, V.; Model, R.:JANUS: High Temperature Transient Hot Bridge Sensor, in Proc. 28th Int. Therm. Cond. Conf. St.-Andrews-by-the-Sea, CDN, 26.-29.06.2005, eds. Dinwiddie, White, Mc Elroy (Lancaster, DEStech Publ.) 2006

[6] Model, R., Stosch, R., Hammerschmidt, U.: Improved Transient Hot Strip Sensor Designed by Means of FEM Simulations, in Proc. 28th Int. Therm. Cond. Conf. St.-Andrews-by-the-Sea, CDN, 26.-29.06.2005, eds. Dinwiddie, White, Mc Elroy (Lancaster, DEStech Publ.) 2006

[7] Hammerschmidt, U., Meier, V.: New Transient Hot Bridge Sensor to Measure Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Volumetric Specific Heat, Int. J. Thermophys. “online first”, 2006

[8] Hammerschmidt, U; Meier, V.; Model, R.: Transient Hot Bridge THB Method: Uncertainty assessment, The Seventeenth European Conference on Thermophysical Properties (ECTP), Bratislava, Slovakia, 04-08.09.2005

[9] Meinlschmidt, P.; Hammerschmidt, U: Schnelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, FNR Statusseminar, Münster 29. – 30.11.2007

5.11 Anlagen

Anlage 1: Untersuchungsmaterialien und Messergebnisse

Material 1:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Cellulose-Flocken		D	30 - 55	0,037

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0405 (10 cm) 0,0413 (8 cm) 0,0439 (6 cm) 0,0532 (4cm)	2,9	32,2 40,25 53,67 80,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0384 (10 cm) 0,0432 (8 cm) 0,0435 (6 cm) 0,0555 (4 cm)	10,7	29,272 36,59 48,79 73,18

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C /70 % rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0407 (10 cm) 0,0415 (8 cm) 0,046 (6 cm) 0,0538 (4 cm)	13,3	28,67 35,84 47,79 71,68

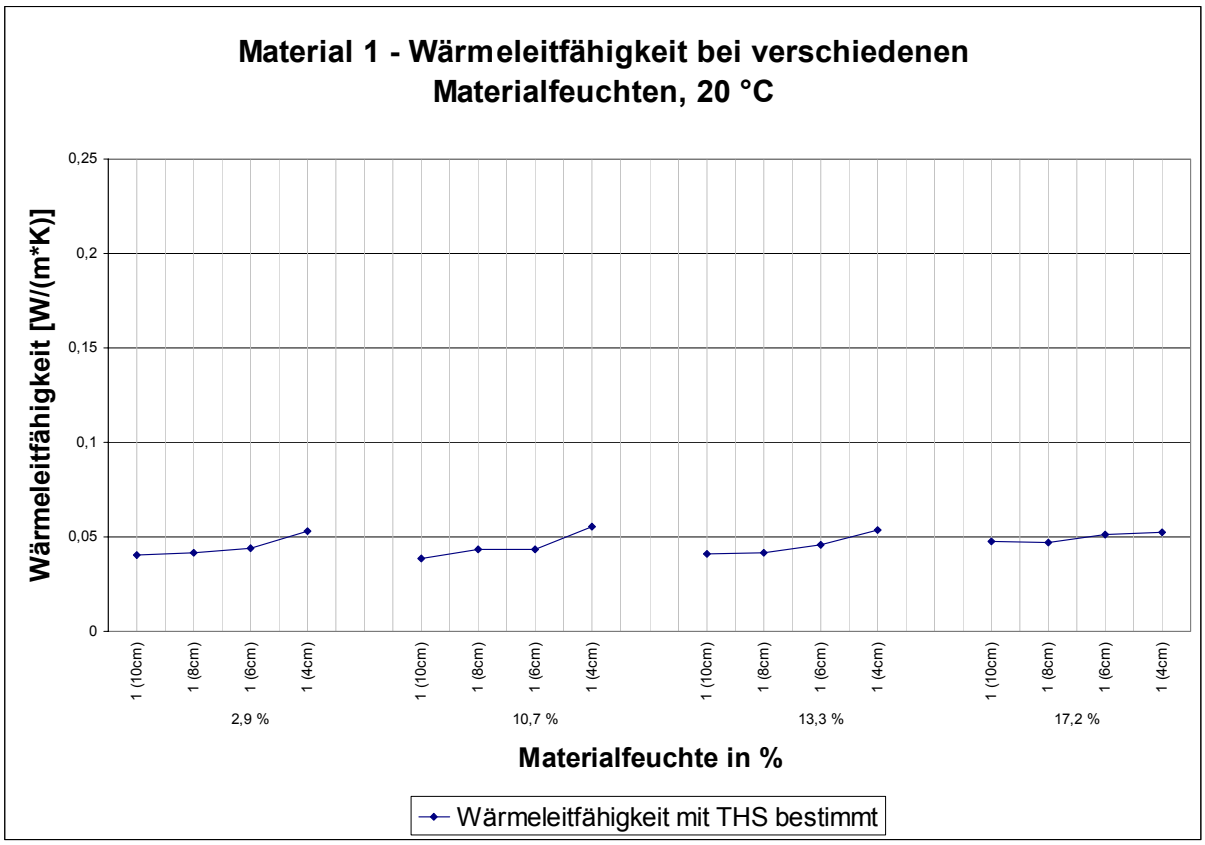
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C /85 % rel. Luftfeuchte:

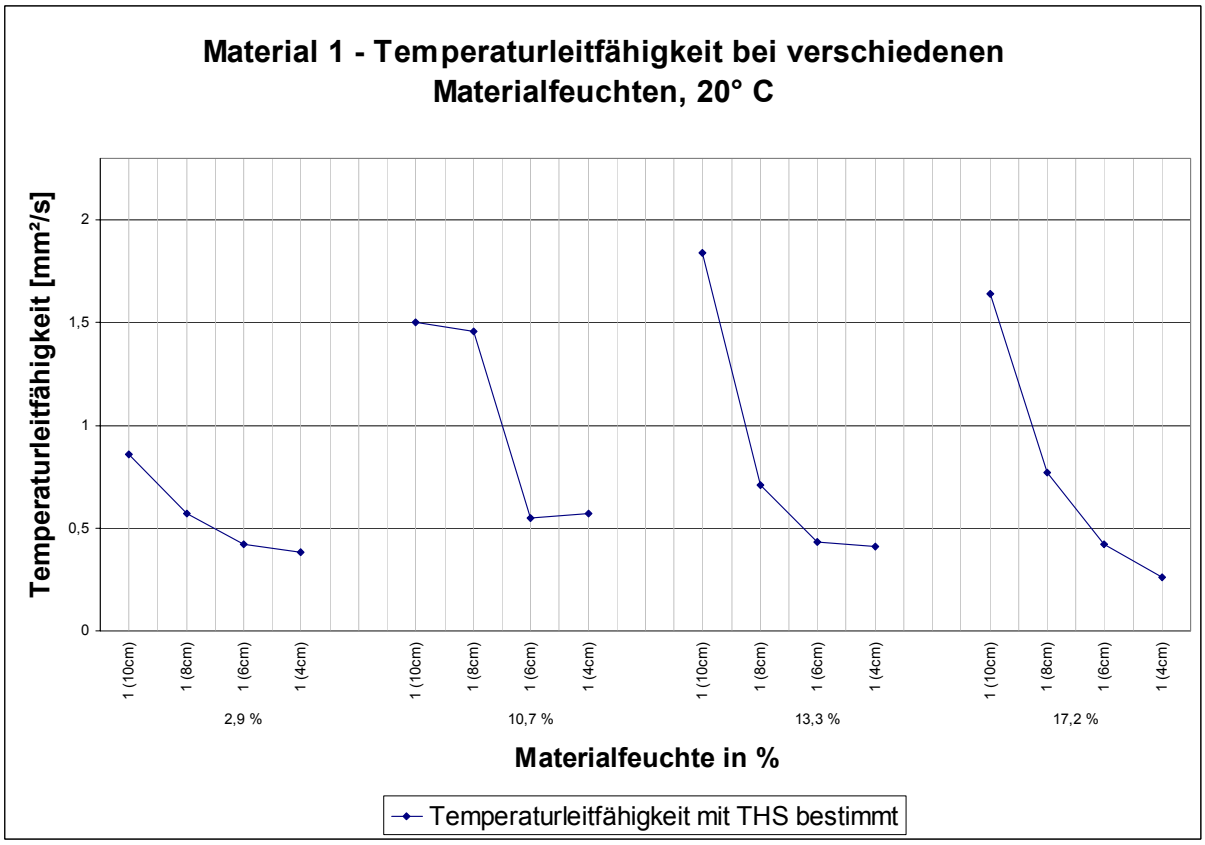
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0473 (10 cm) 0,0472 (8 cm) 0,0511 (6 cm) 0,0527 (4 cm)	17,2	39,02 48,78 65,04 97,56

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 1: Cellulose-Flocken
Dichte (Kg/m^3): 48,2 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 12 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0437	0,0454
10	0,0452	
23	0,0463	


Material 1 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
1 (10cm)
1 (8cm)
1 (6cm)
1 (4cm)
2,9 %
10,7 %
13,3 %
17,2 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 1 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
1 (10cm)
1 (8cm)
1 (6cm)
1 (4cm)
2,9 %
10,7 %
13,3 %
17,2 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 2:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Nadelholz-Späne	unbekannt	unbekannt	-	-

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0583 (10 cm) 0,0591 (8 cm) 0,0743 (6 cm)[5]	4,5	52 65 86,67

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0605 (10 cm) 0,0657 (8 cm) 0,0853 (6 cm)[5]	10,7	52,15 65,19 86,92

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0607 (10 cm) 0,0697 (8 cm) 0,0631 (6 cm)[5]	15,3	60,41 75,52 100,69

[5] (4 cm) existiert bei diesem Material nicht, da es sich nicht so stark verdichten ließ.

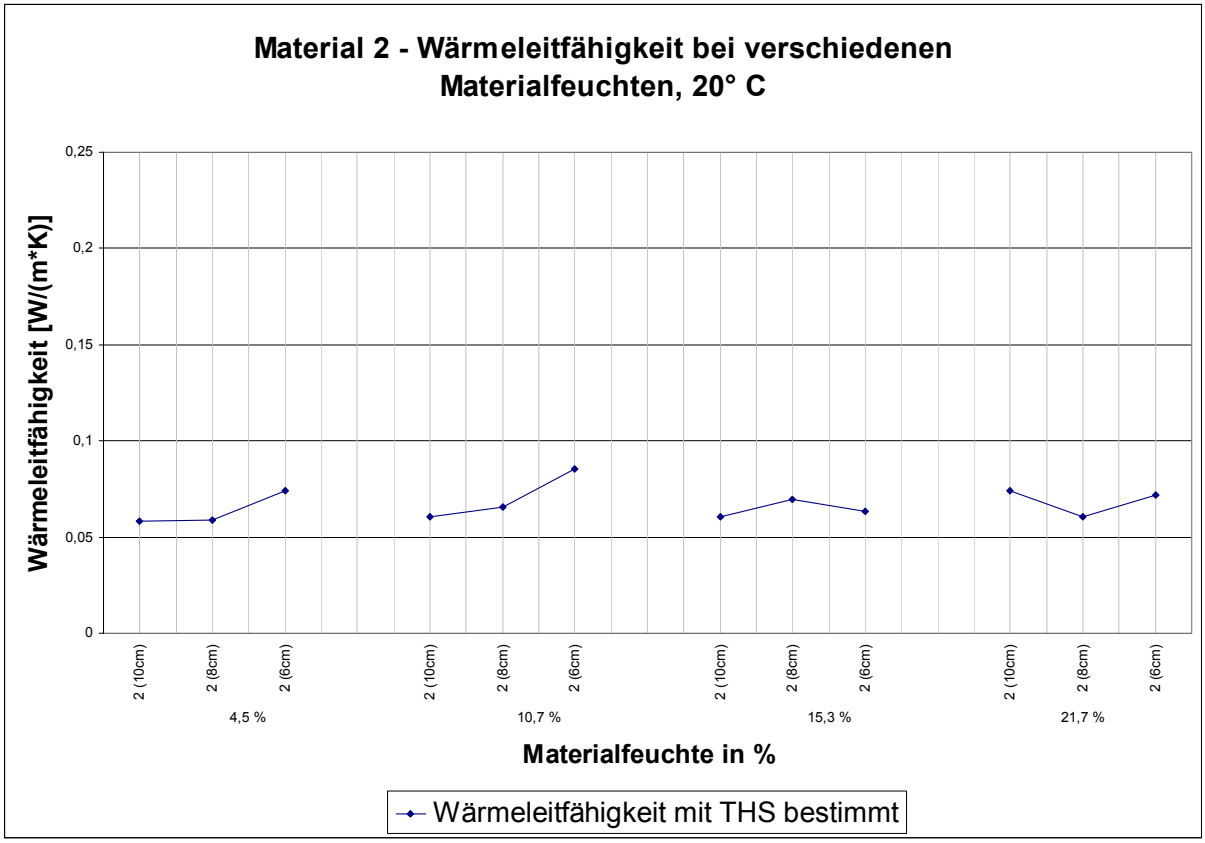
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

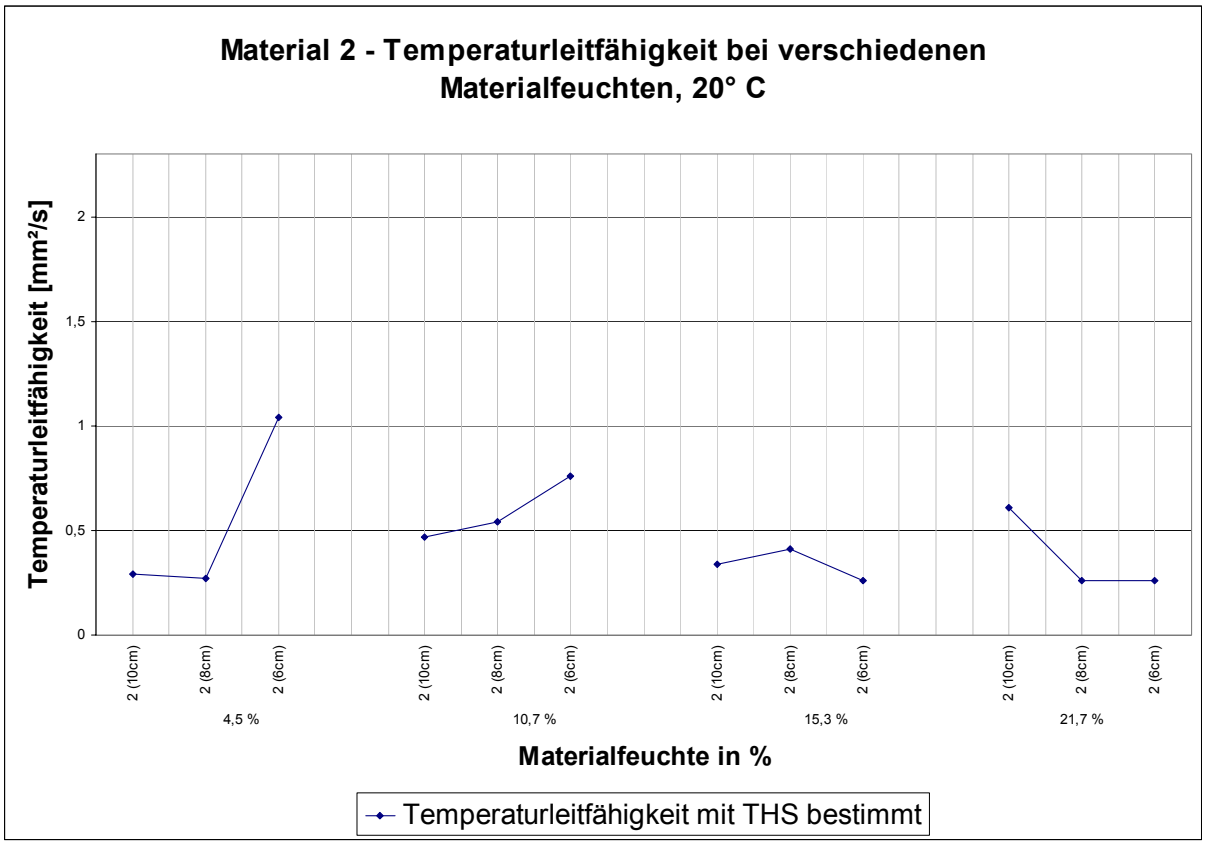
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,074 (10 cm) 0,0607 (8 cm) 0,0720 (6 cm) [5]	21,7	63,65 79,56 106,08

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 2: Nadelholz-Späne
Dichte (Kg/m^3): 94,3 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 12 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0508	0,0509
10	0,0518	
23	0,0527	




Material 2 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
2 (10cm)
2 (8cm)
2 (6cm)
4,5 %
10,7 %
15,3 %
21,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 3:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Cellulose-Platten		M	60 - 90	0,039

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,047	8,1	66,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

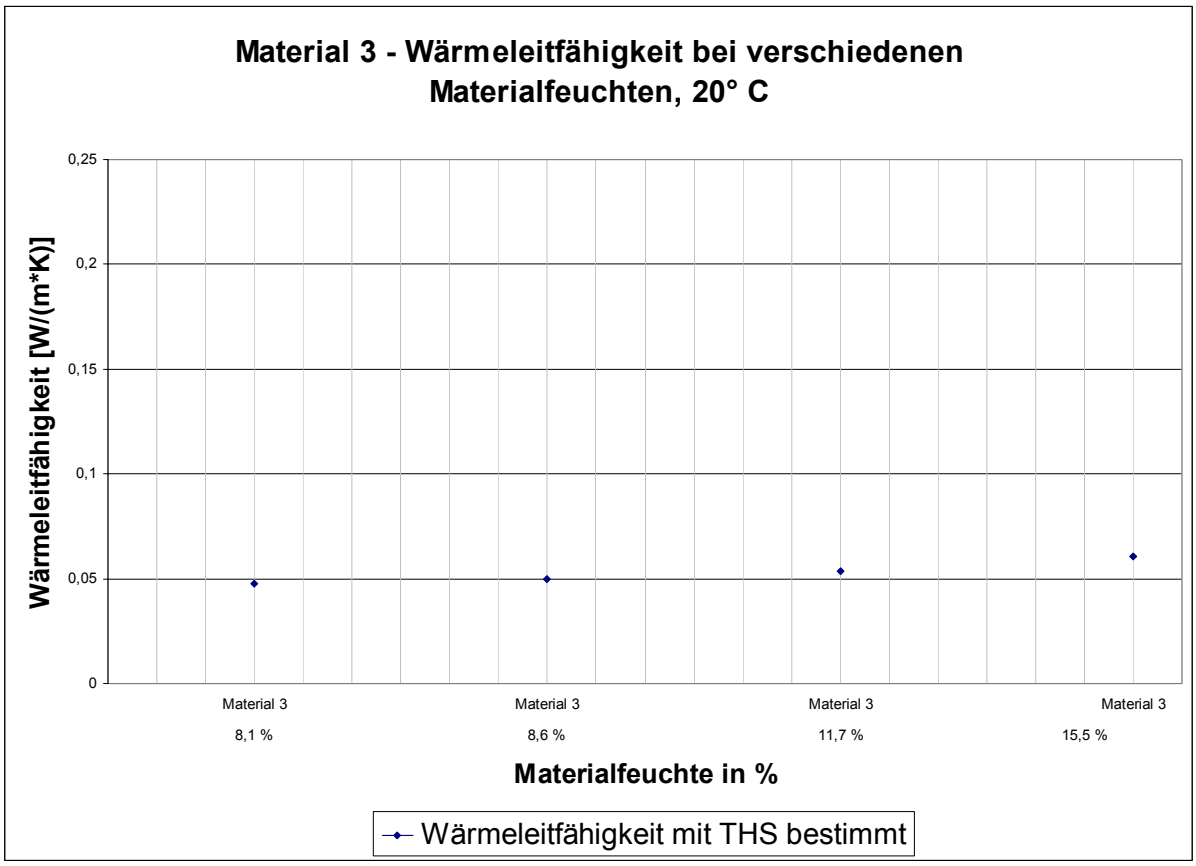
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,05	8,6	66,8

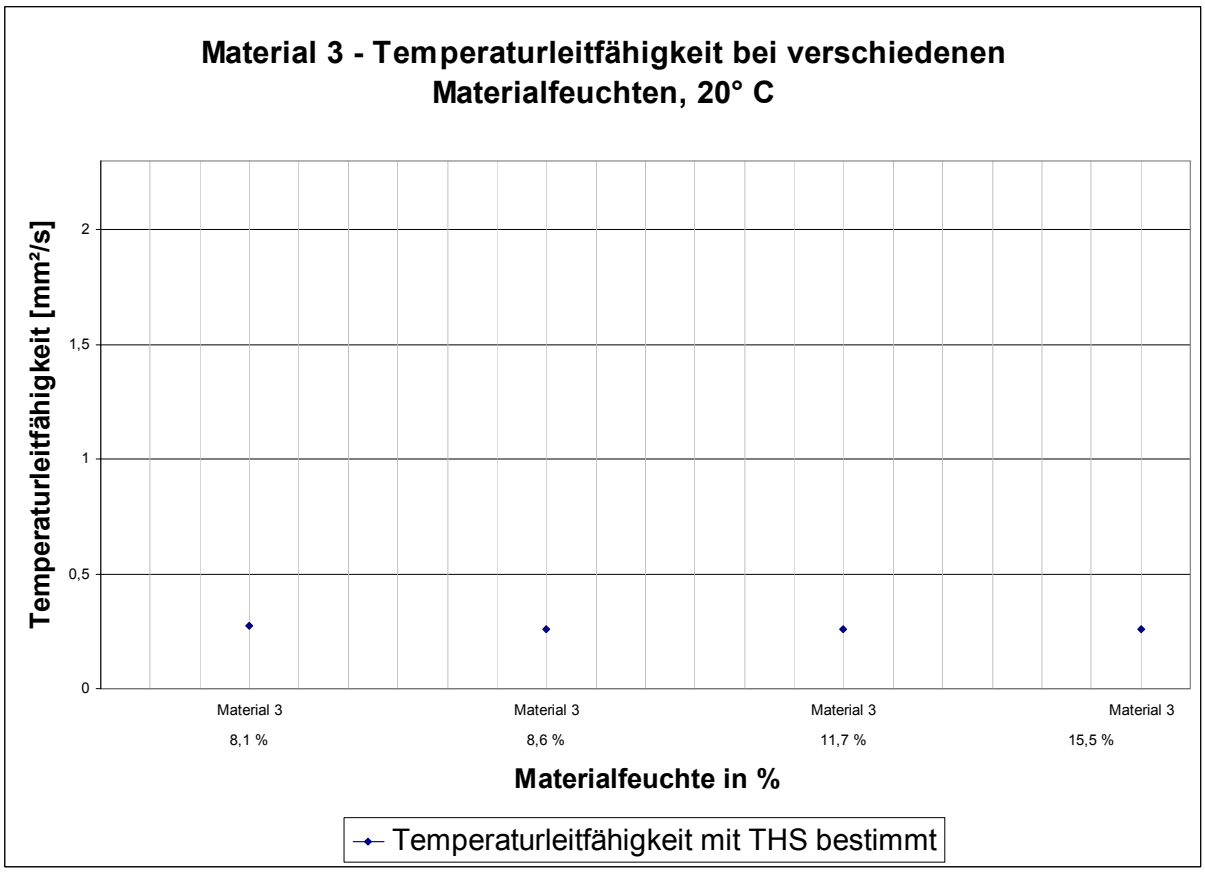
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,054	11,7	68,9

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0605	15,5	71,2


Material 3 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 3
8,1 %
Material 3
8,6 %
Material 3
11,7 %
Material 3
15,5 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 3 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 3
8,1 %
Material 3
8,6 %
Material 3
11,7 %
Material 3
15,5 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 4:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Mineralfaser-Lamellenplatten		S	80 (ohne Putz)	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,033	0,6	107

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,034	0,6	107

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,044	0,9	107,3

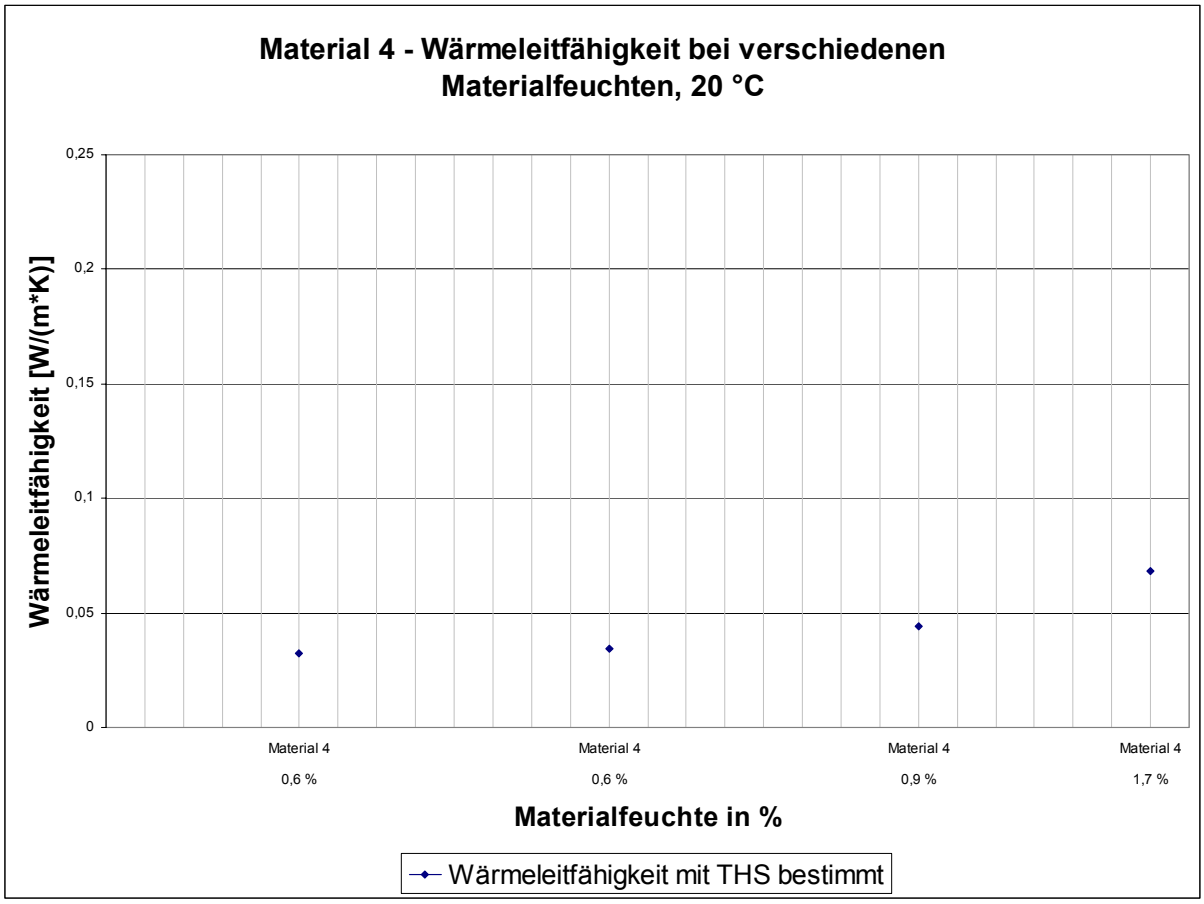
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

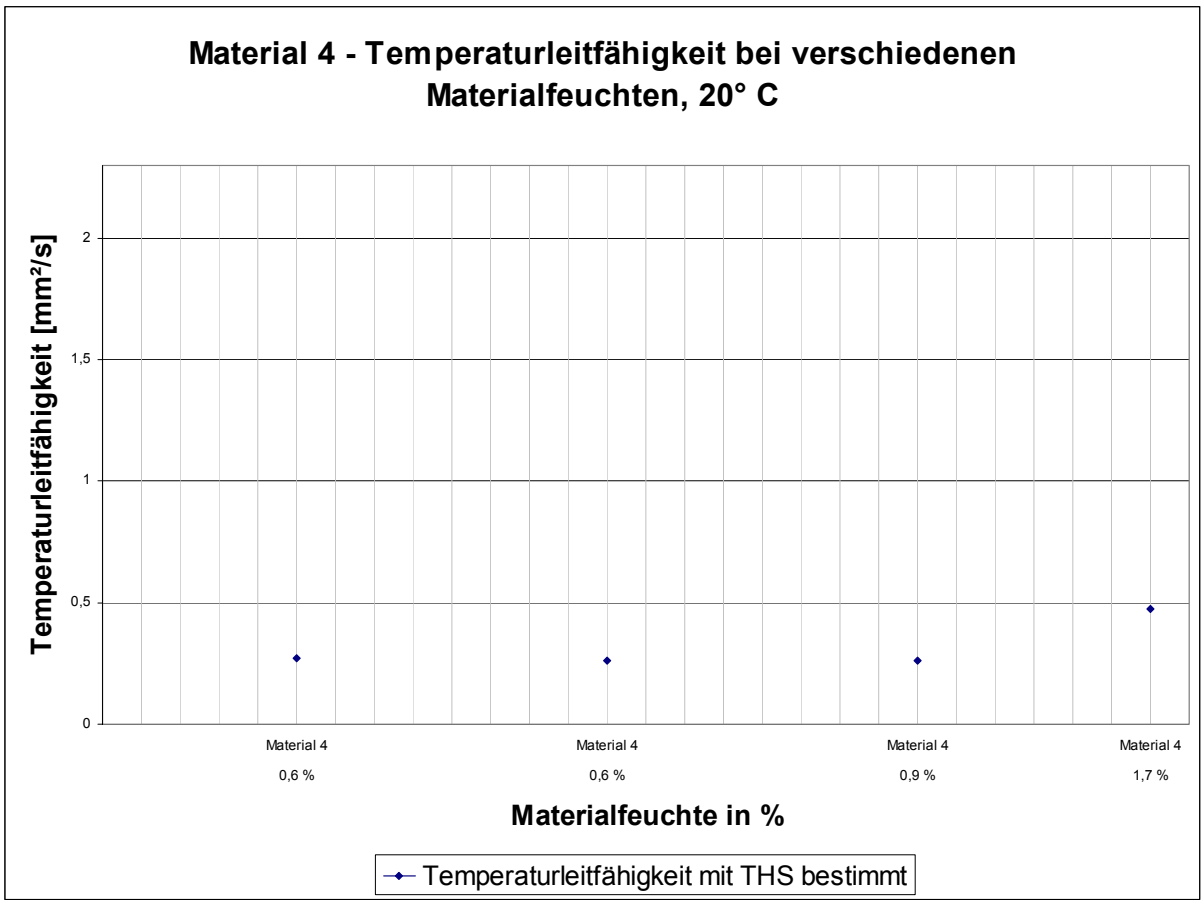
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0682	1,7	108,2

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 4: Mineralfaser-Lamellenplatten
Dichte (Kg/m^3): 102 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: 21,2 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,040	0,0387
10	0,0406	
23	0,0415	




Material 4 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 4
0,6 %
Material 4
0,6 %
Material 4
0,9 %
Material 4
1,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 5:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Faserplatten		M	55	0,038

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,045	7,6	61,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

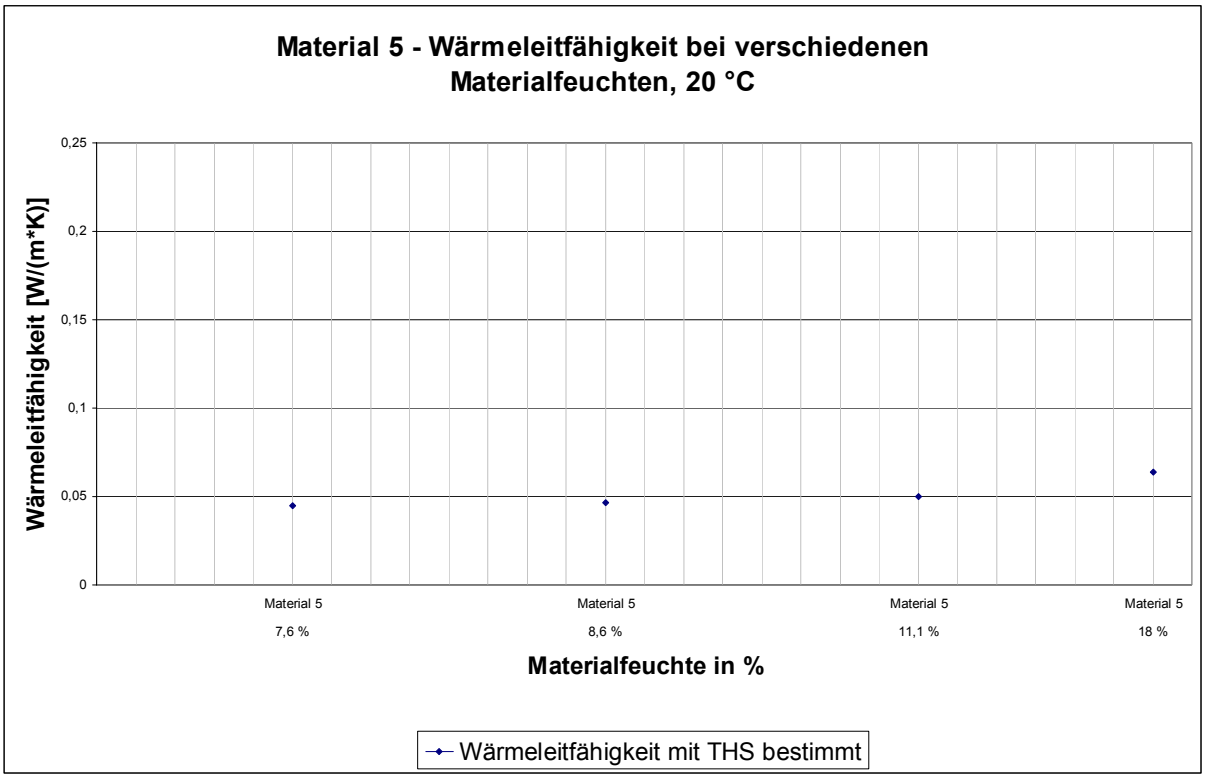
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,046	8,6	62,1

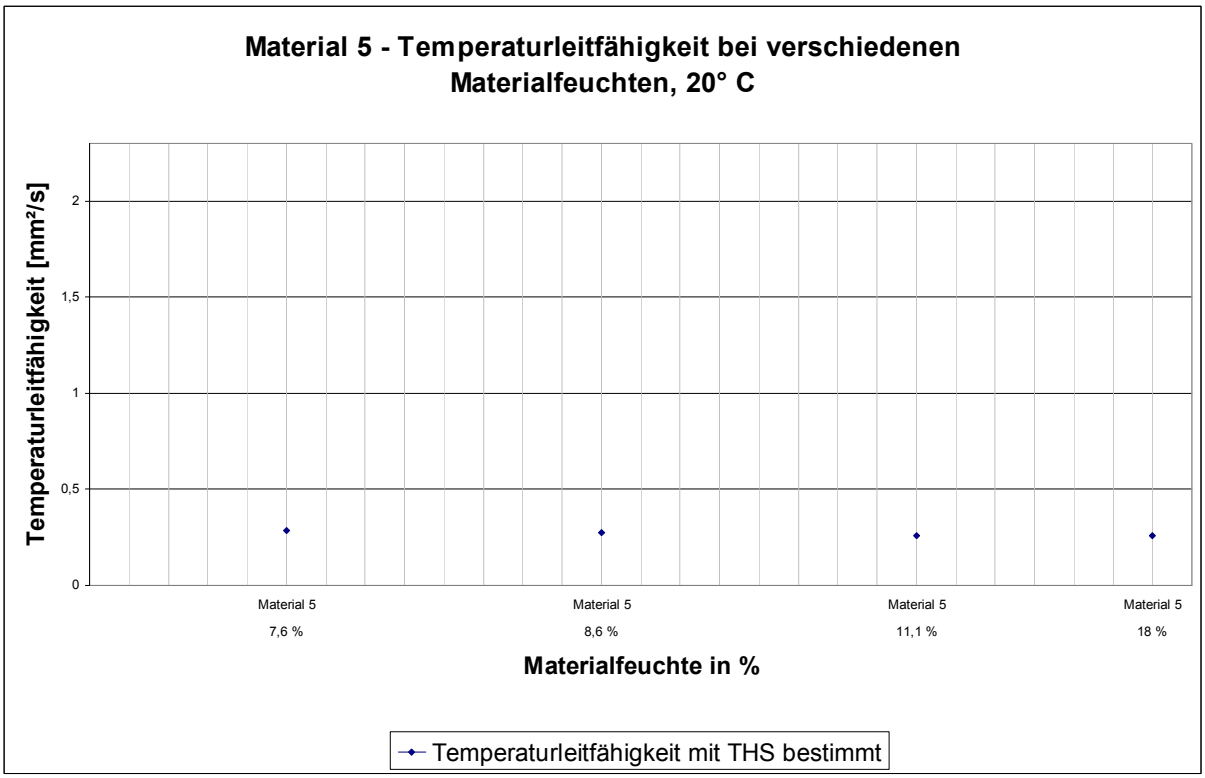
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,05	11,1	63,7

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C /85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0639	18,0	67,9


Material 5 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 5 7,6 %
Material 5 8,6 %
Material 5 11,1 %
Material 5 18 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 5 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 5 7,6 %
Material 5 8,6 %
Material 5 11,1 %
Material 5 18 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 6:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Flachs-Faserplatte		G	30	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,043[6]	7,2	32,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,048[5]	6,3	32,2

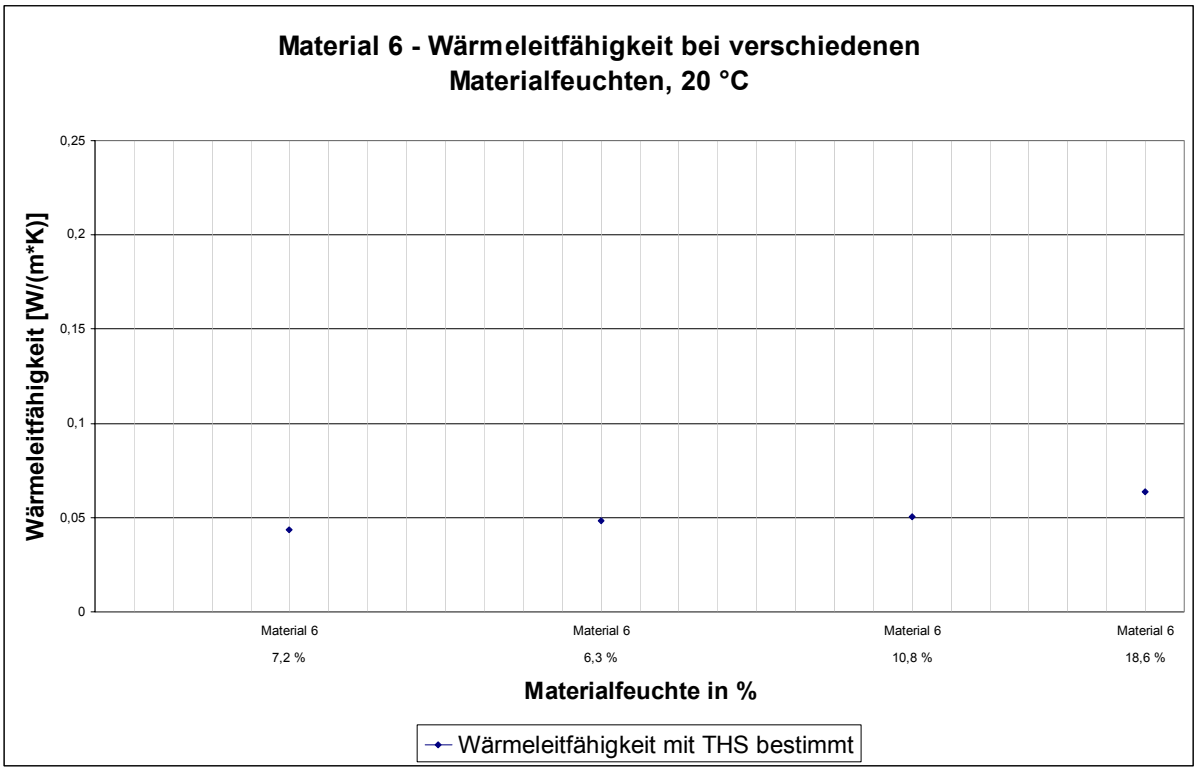
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

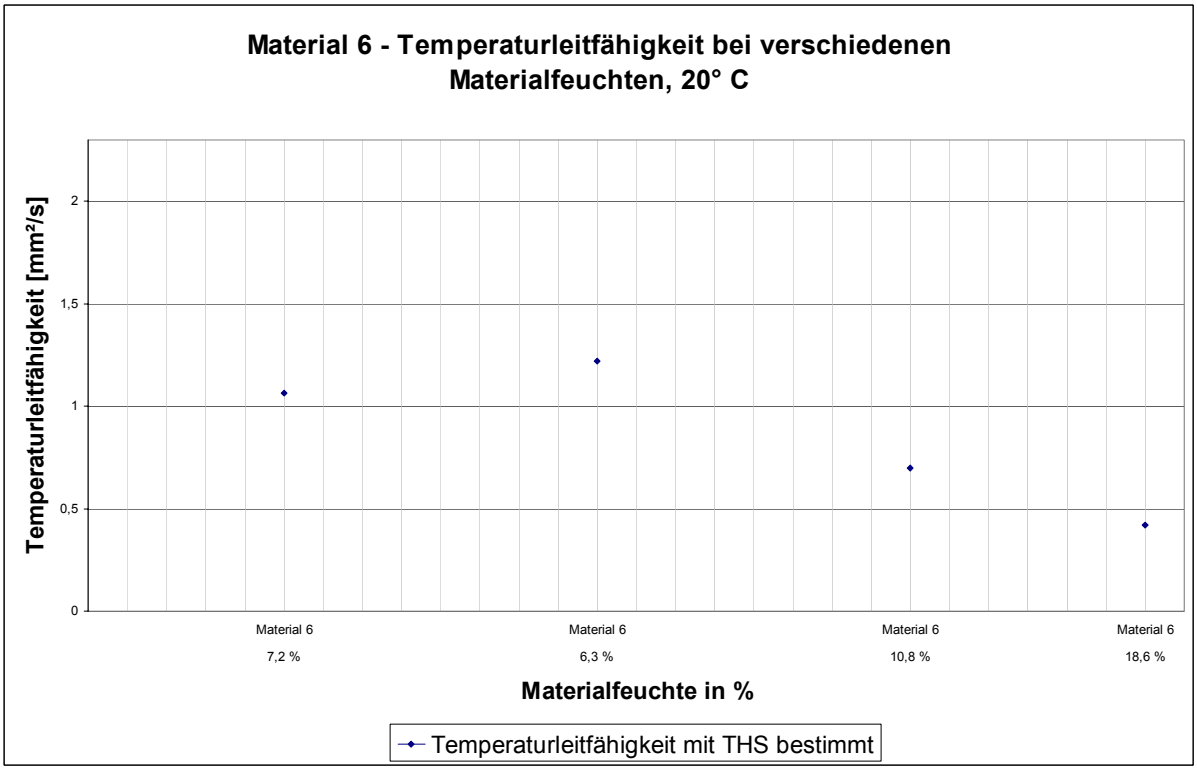
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,05[5]	10,8	33,7

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,064[5]	18,6	36,2

[6] Material wurde nicht mit 3 Nm Anpressdruck eingestellt, sondern auf je 8 cm zusammengedrückt.


Material 6 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 6
7,2 %
Material 6
6,3 %
Material 6
10,8 %
Material 6
18,6 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 6 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 6
7,2 %
Material 6
6,3 %
Material 6
10,8 %
Material 6
18,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 7:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Hanf-Fasermatte		AF	24 - 42	0,04 (Rechenwert)

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,047[7]	5,5	30,7

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,046[7]	5,3	30,6

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,05[7]	9,3	31,9

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,057[7]	13,8	33,2

[7] Material wurde nicht mit 3 Nm Anpressdruck eingestellt, sondern auf je 4 cm zusammengedrückt.

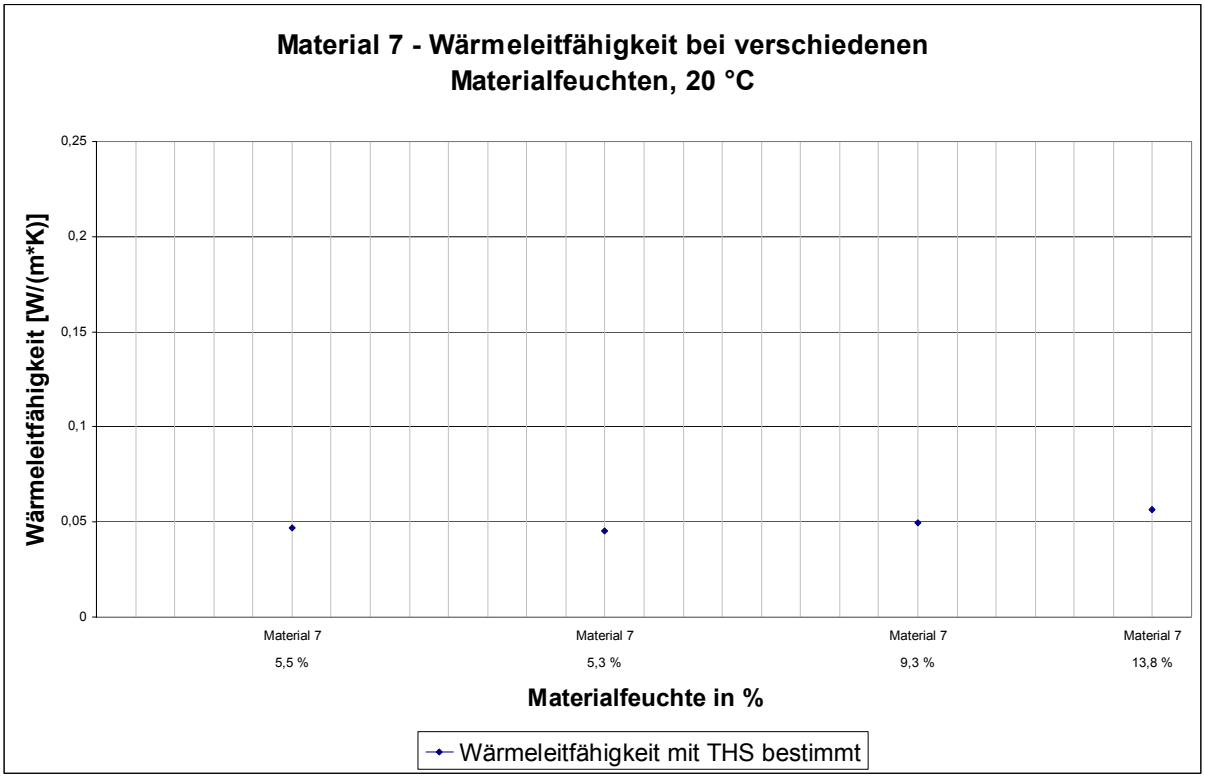
Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

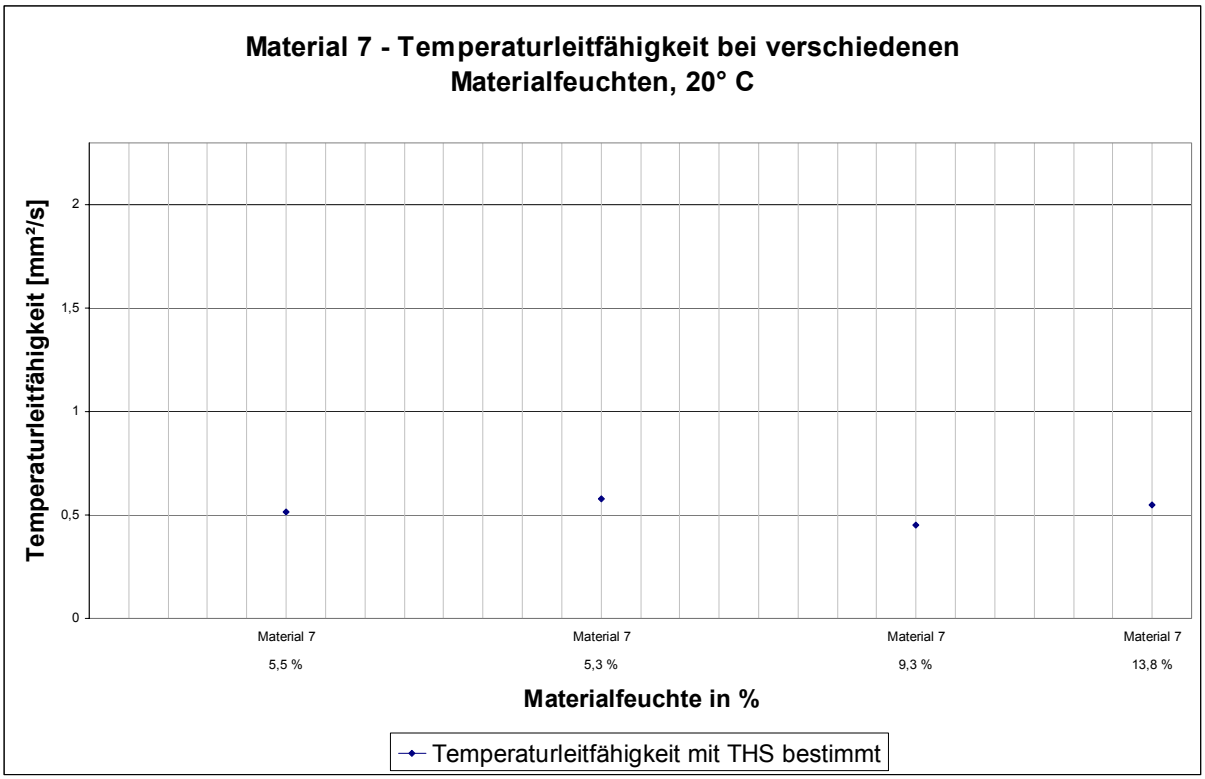
Material Nr. 7.43: Hanf-Fasermatte
Dichte (Kg/m^3): 52,3 Belastung: ca. 28 N (Heizplatte) Dicke: ca. 17 mm

Temperatur [°C]	1. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0377	0,0372
10	0,0385	
23	0,0385	

Material Nr. 7.44: Hanf-Fasermatte
Dichte (Kg/m^3): 44,9 Belastung: ca. 28 N Dicke: ca. 17 mm

Temperatur [°C]	1. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0382	0,0388
10	0,0383	
23	0,0391	




Material 7 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 7
5,5 %
Material 7
5,3 %
Material 7
9,3 %
Material 7
13,8 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 8:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Baumwolle-Matte		O	20-60	0,036

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,042 (10 cm) 0,0421 (8 cm) 0,0435 (6 cm) 0,0598 (4 cm)	?	22,81 28,51 38,01 57,02

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

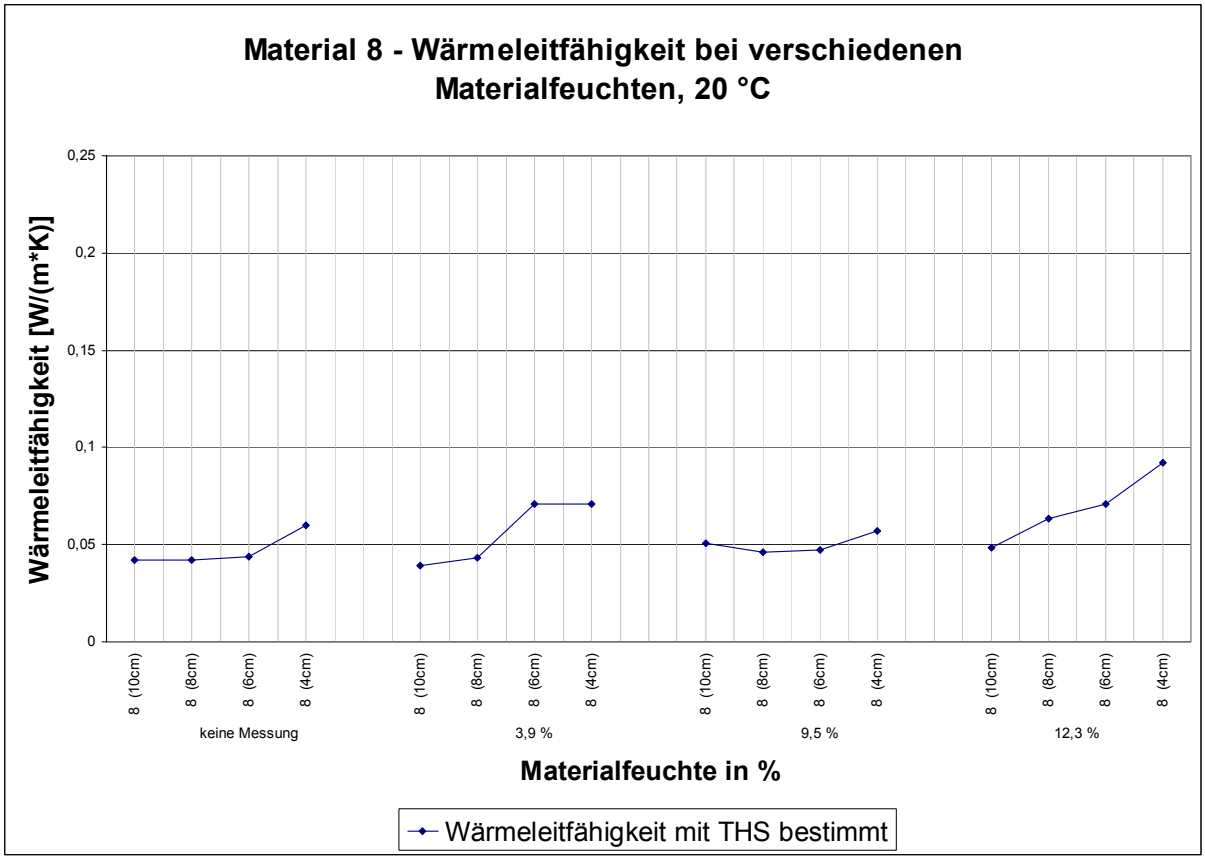
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0393 (10 cm) 0,0433 (8 cm) 0,0709 (6 cm) 0,0707 (4 cm)	3,9	30,59 38,24 50,99 76,48

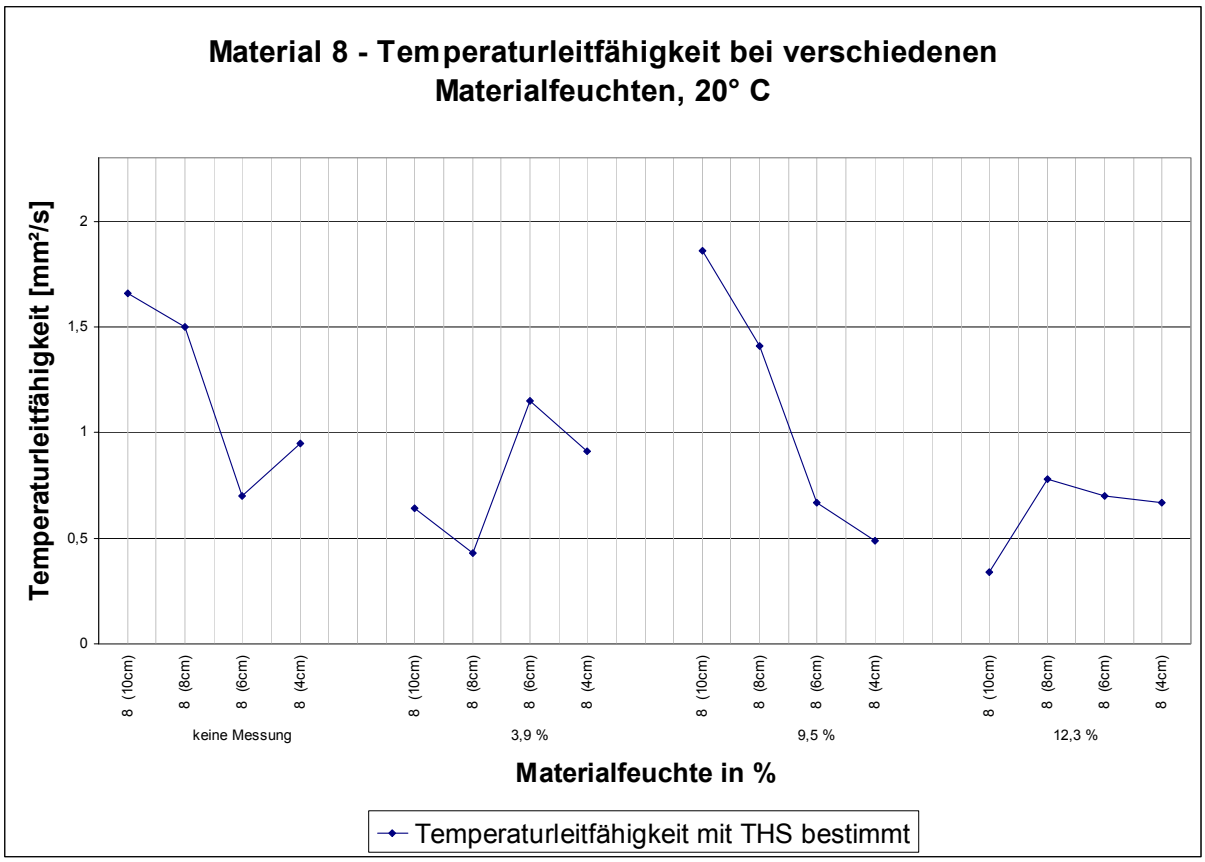
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0506 (10 cm) 0,0461 (8 cm) 0,0471 (6 cm) 0,0572 (4 cm)	9,5	29,92 37,4 49,87 74,8

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0482 (10 cm) 0,0638 (8 cm) 0,0709 (6 cm) 0,0919 (4 cm)	12,3	27,18 33,98 45,3 67,95




Material 8 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
8 (10cm)
8 (8cm)
8 (6cm)
8 (4cm)
keine Messung
3,9 %
9,5 %
12,3 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 9:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Polystyrol Platte (geschlossenzellig)		Z	35	0,033

Referenzmaterial

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,028	0,4	37,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,027	0,5	37,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,028	0,5	37,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,028	0,3	37,5

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

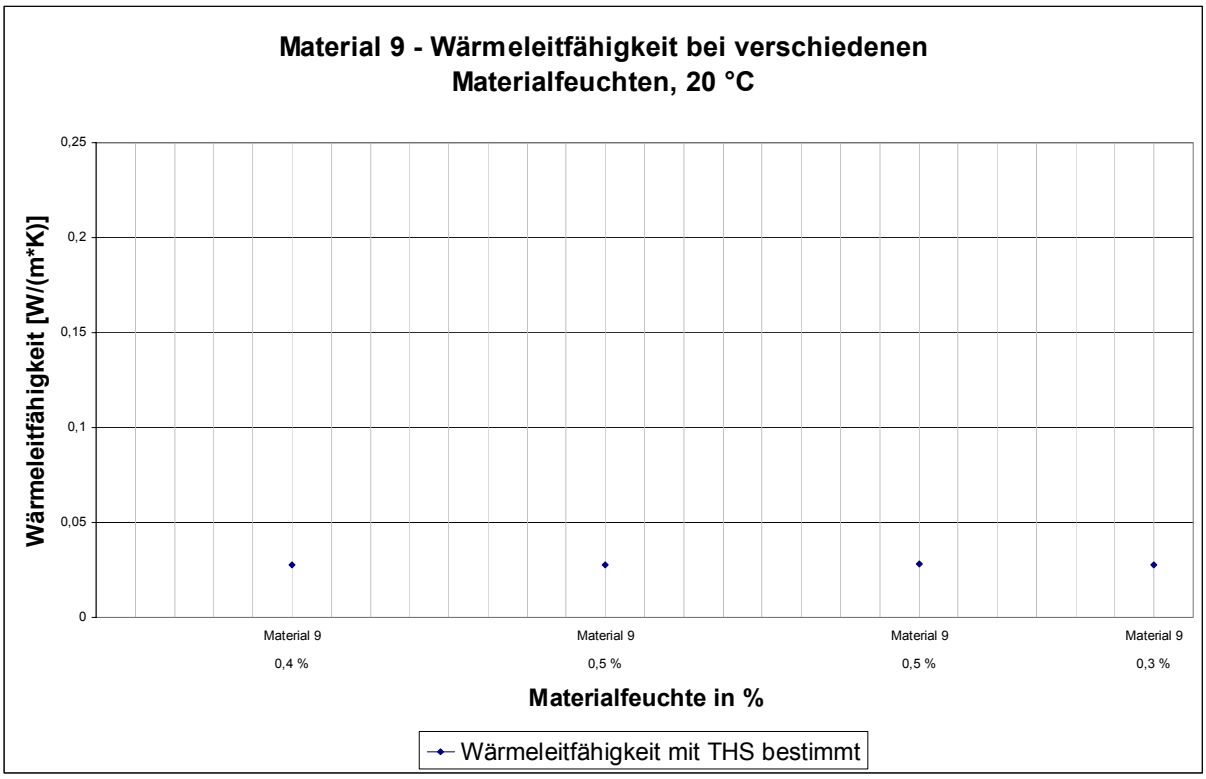
Material Nr. 9.45: Polystyrol Platte
Dichte (Kg/m^3): 37,2 Belastung: ca. 50 N (Heizplatte) Dicke: 19,16 mm

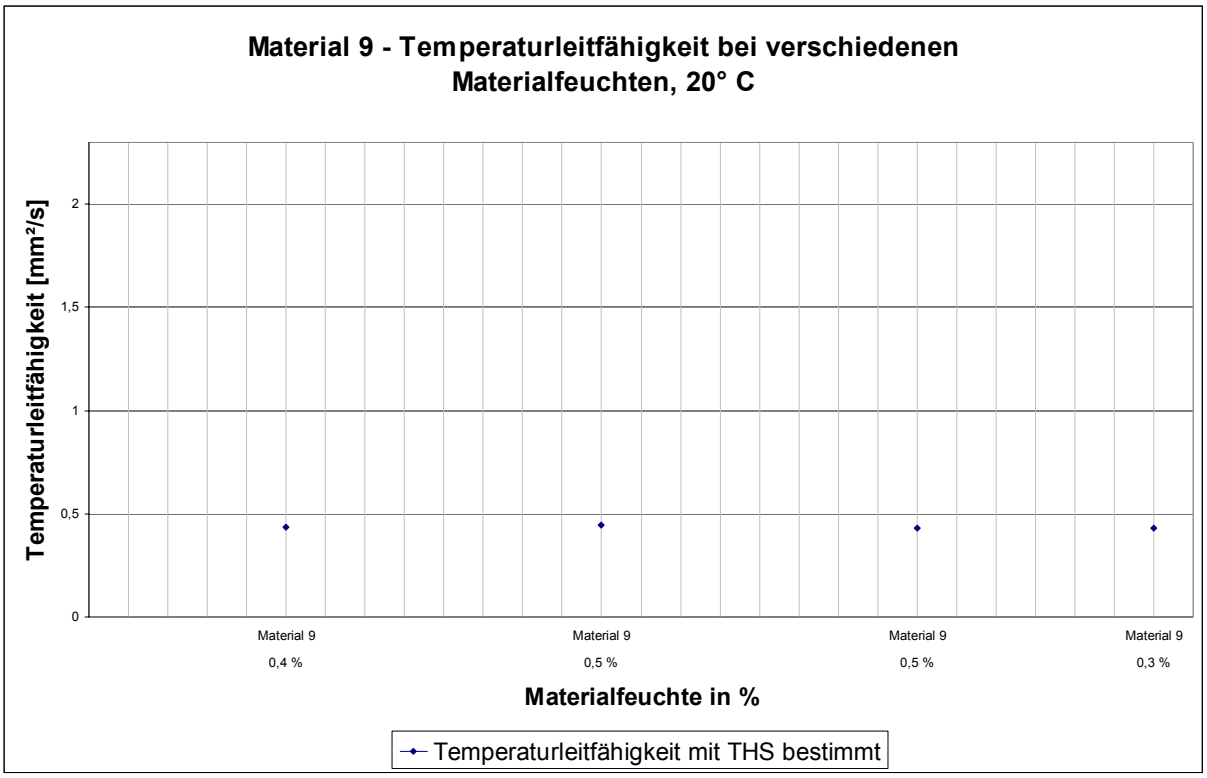
Temperatur [°C]	1. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0315	0,0311
10	0,0311	
23	0,032	

Material Nr. 9.46: Polystyrol Platte
Dichte (Kg/m^3): 37,4 Belastung: ca. 50 N (Heizplatte) Dicke: 20,56 mm

Temperatur [°C]	1. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0333	0,033
10	0,0339	
23	0,0342	

Die mit dem Plattenverfahren ermittelten Werte für die Wärmeleitfähigkeit stimmen gut mit den Angaben des Herstellers überein. Die im THB – Verfahren bestimmten Werte liegen etwas niedriger.




Material 9 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 9
0,4 %
Material 9
0,5 %
Material 9
0,5 %
Material 9
0,3 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 10:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Cellulose-Flocken		T	45-65	0,037

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0403 (10 cm) 0,0404 (8 cm) 0,0432 (6 cm) 0,0516 (4 cm)	6,0	21,22 26,53 35,37 53,06

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

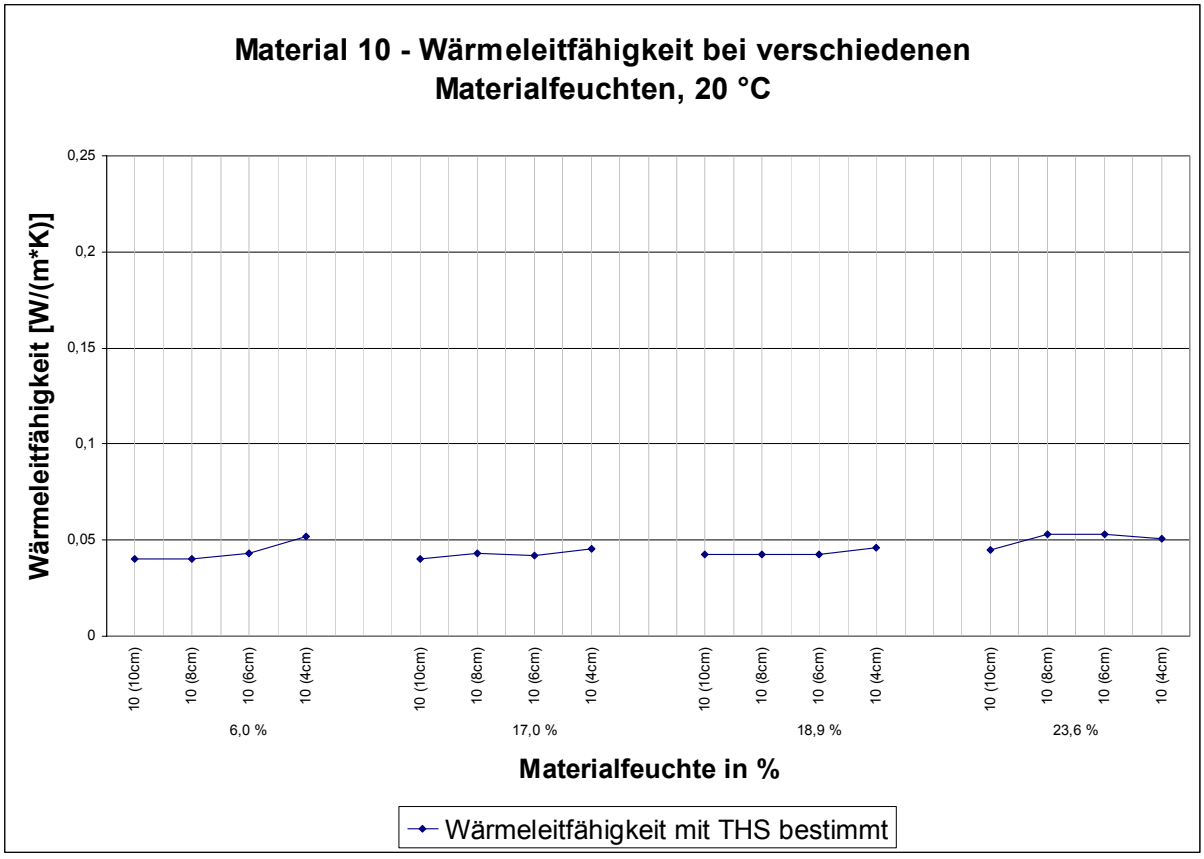
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0402 (10 cm) 0,0432 (8 cm) 0,0422 (6 cm) 0,0453 (4 cm)	17,0	20,62 25,77 34,36 51,55

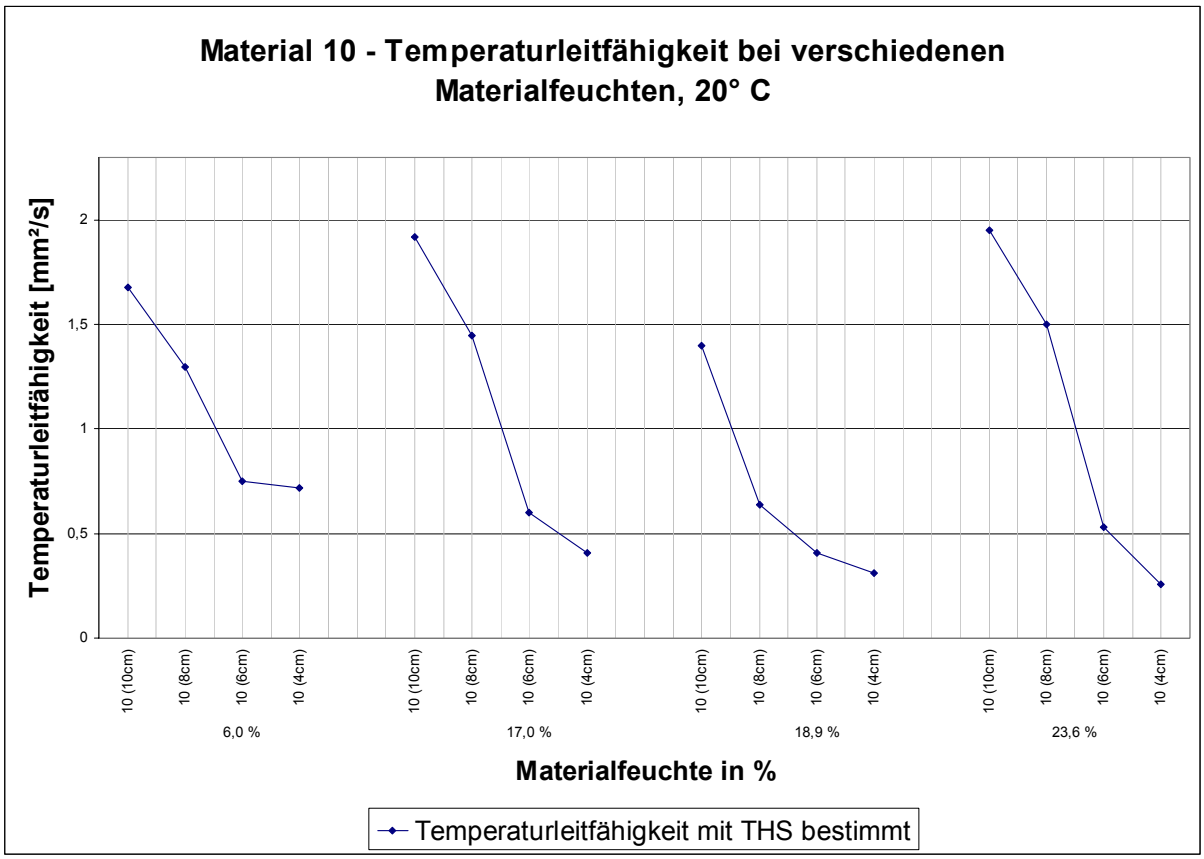
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0428(10 cm) 0,0427 (8 cm) 0,0427 (6 cm) 0,0462 (4 cm)	18,9	25,75 32,19 42,91 64,37

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0451(10 cm) 0,0528 (8 cm) 0,0533 (6 cm) 0,0505 (4 cm)	23,6	30,22 37,78 50,37 75,55




Material 10 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
10 (10cm)
10 (8cm)
10 (6cm)
10 (4cm)
6,0 %
17,0 %
18,9 %
23,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 11:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Cellulose-Flocken		D	Keine Angabe	0,037

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0371 (10 cm) 0,0413 (8 cm) 0,0489 (6 cm) 0,059 (4 cm)	2,9	26 32,5 43,33 65

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

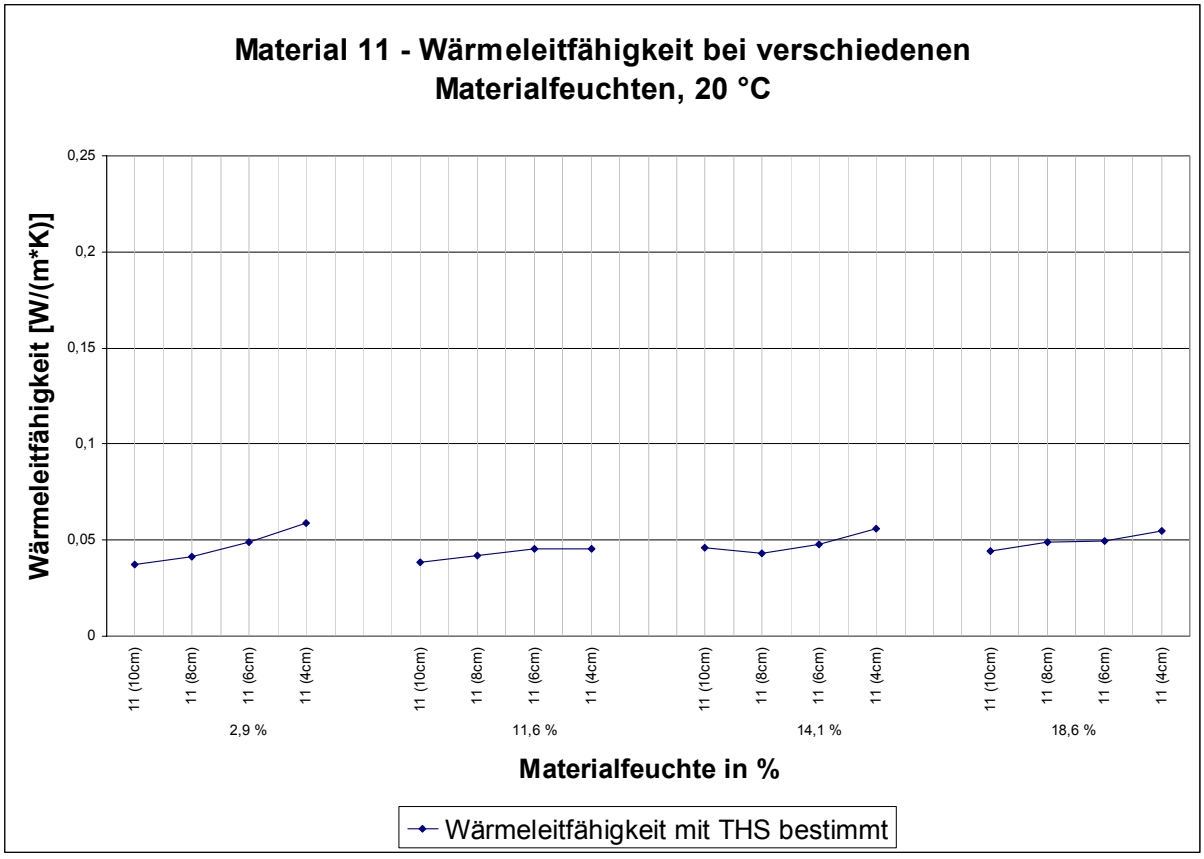
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0385 (10 cm) 0,0417 (8 cm) 0,0452 (6 cm) 0,0554 (4 cm)	11,6	28,82 36,04 48,05 72,08

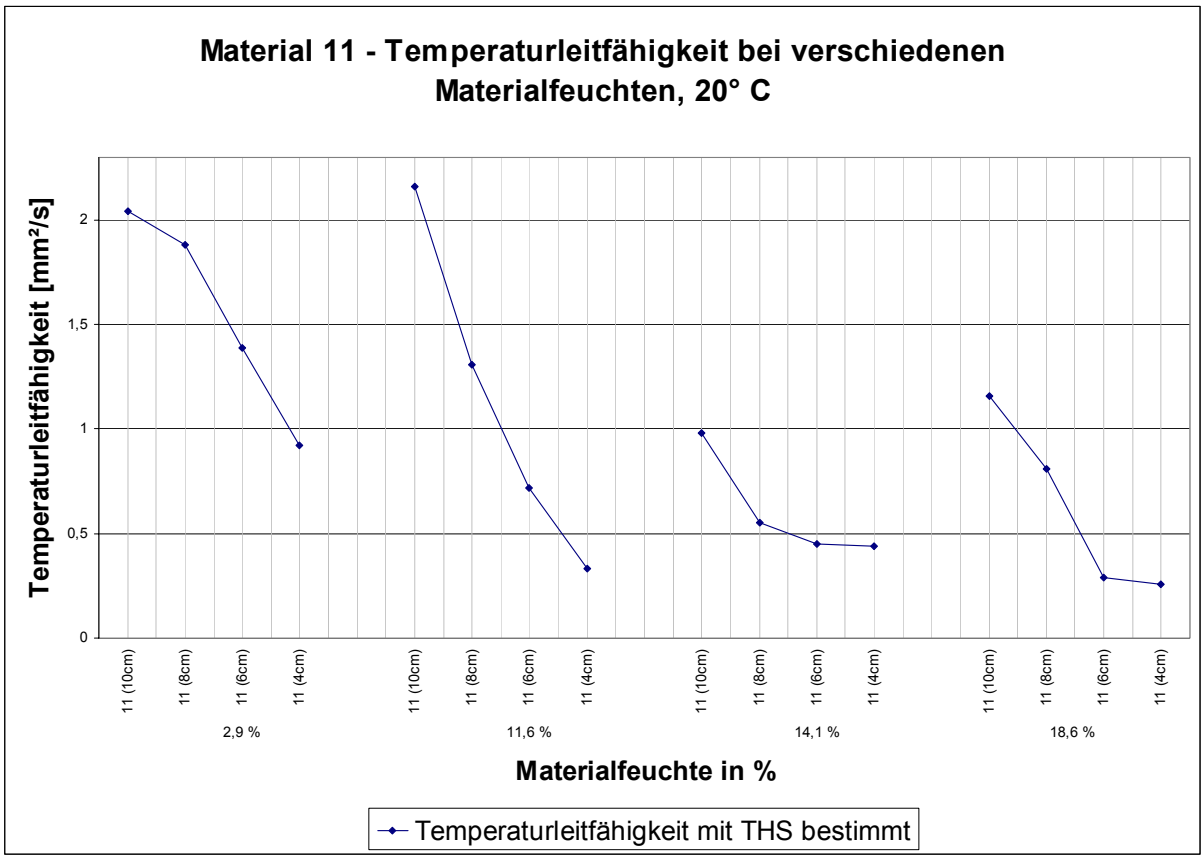
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0461 (10 cm) 0,0434 (8 cm) 0,0475 (6 cm) 0,0561 (4 cm)	14,1	31,62 39,53 52,70 79,06

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,044 (10 cm) 0,0492 (8 cm) 0,0495 (6 cm) 0,0549 (4 cm)	18,6	34,96 43,71 58,27 87,41




Material 11 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
11 (10cm)
11 (8cm)
11 (6cm)
11 (4cm)
2,9 %
11,6 %
14,1 %
18,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 12:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Cellulose-Flocken		Q	35-60	0,037

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0405 (10 cm) 0,0464 (8 cm) 0,0434 (6 cm) 0,0632 (4 cm)	2,5	23,28 29,1 38,8 58,2

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

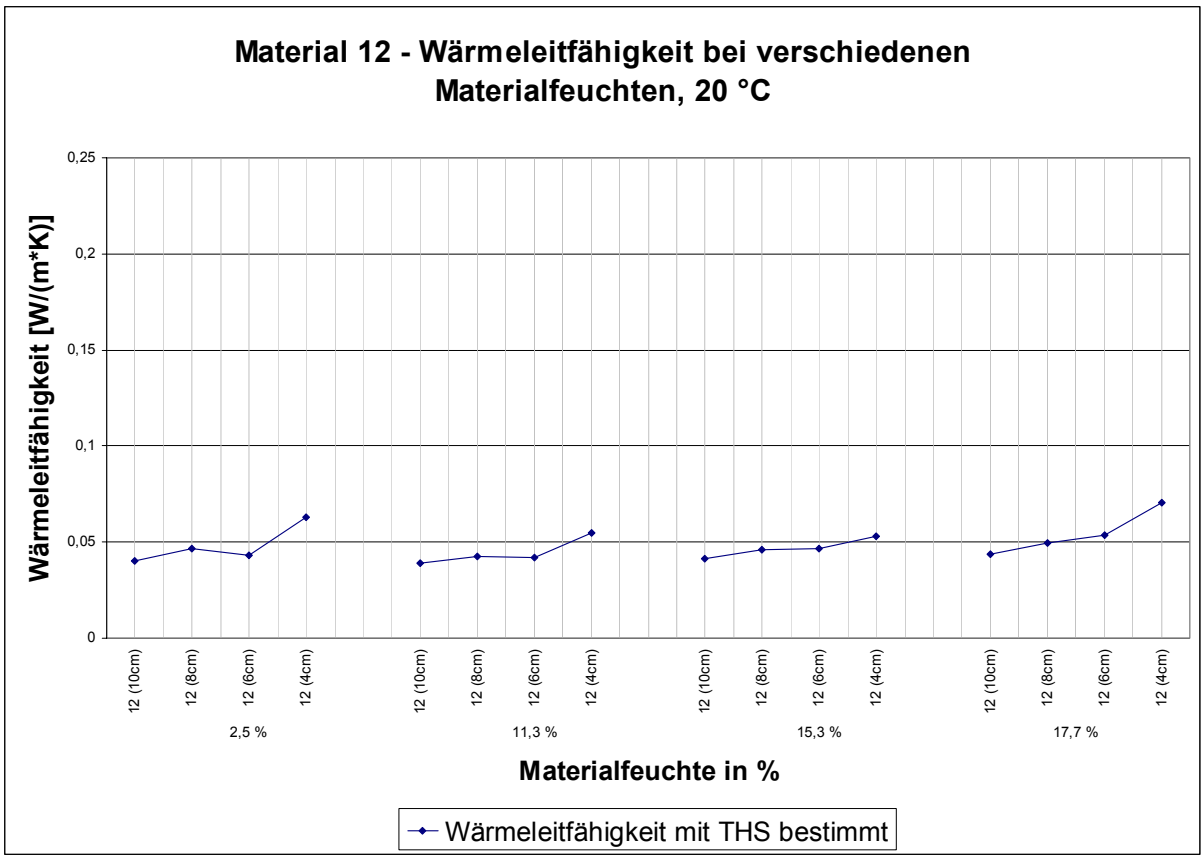
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0393 (10 cm) 0,0426 (8 cm) 0,0419 (6 cm) 0,0547 (4 cm)	11,3	23,67 29,59 39,45 59,19

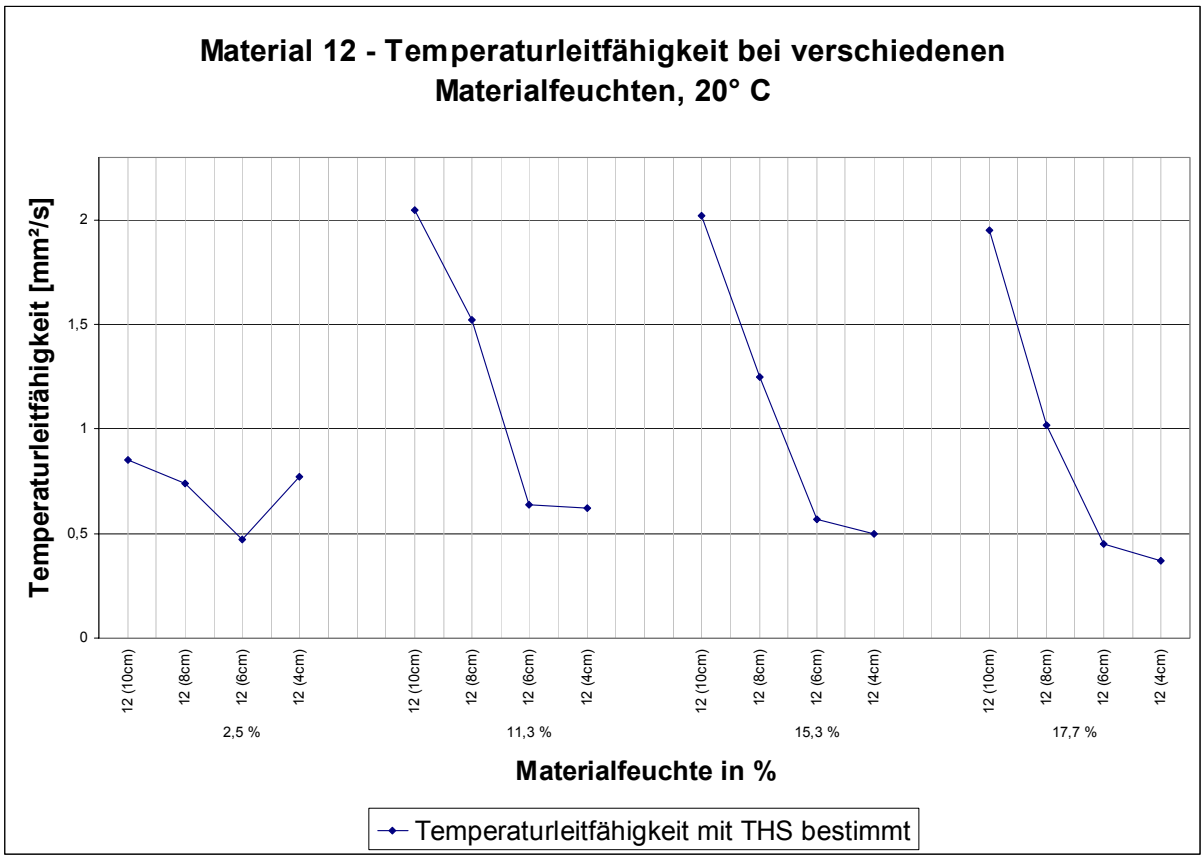
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0416 (10 cm) 0,0458 (8 cm) 0,0465 (6 cm) 0,0533 (4 cm)	15,3	28,46 35,57 47,43 71,15

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0435 (10 cm) 0,0494 (8 cm) 0,0539 (6 cm) 0,0706 (4 cm)	17,7	35,73 44,66 59,55 89,32




Material 12 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
12 (10cm)
12 (8cm)
12 (6cm)
12 (4cm)
2,5 %
11,3 %
15,3 %
17,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 13:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Cellulose-Flocken		I	35-60	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0401 (10 cm) 0,0426 (8 cm) 0,0451 (6 cm) 0,0421 (4 cm)	6,8	23,72 29,65 39,53 59,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

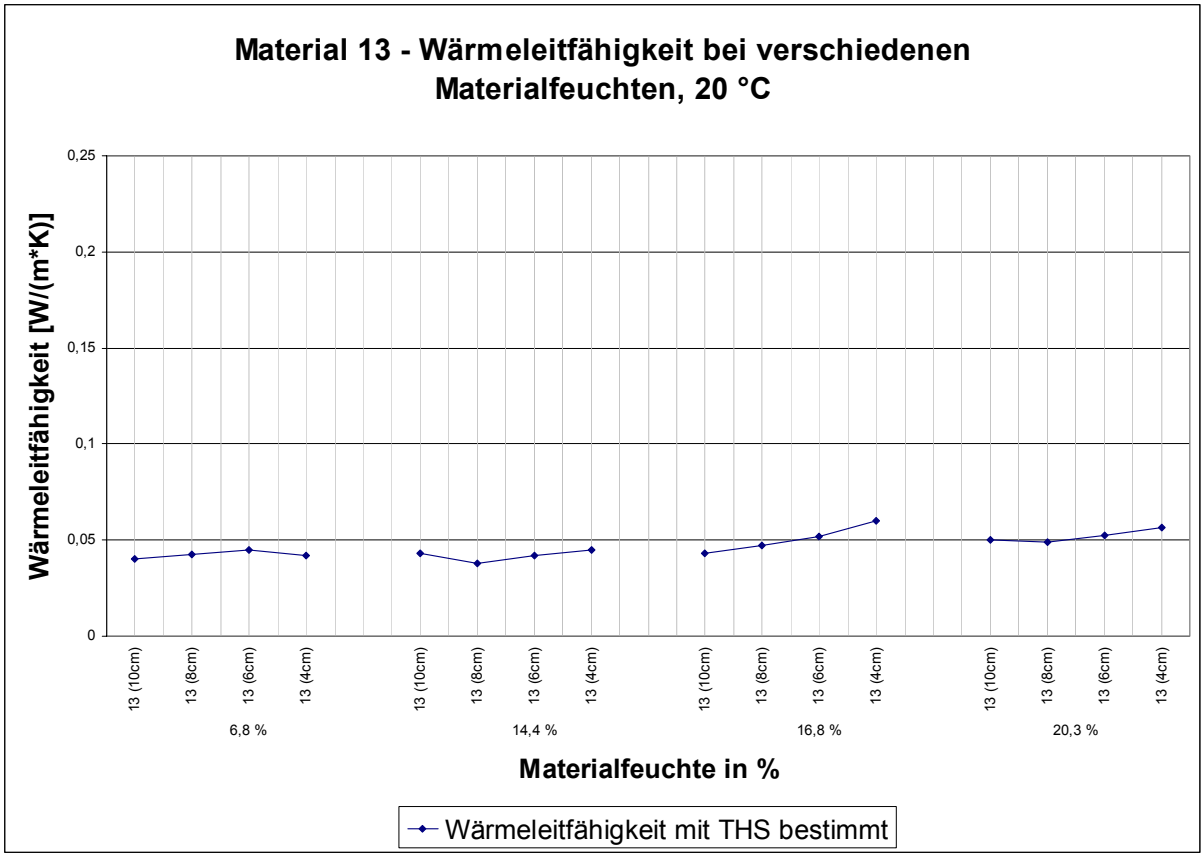
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0434 (10 cm) 0,0379 (8 cm) 0,042 (6 cm) 0,0446 (4 cm)	14,4	25,25 31,56 42,08 63,12

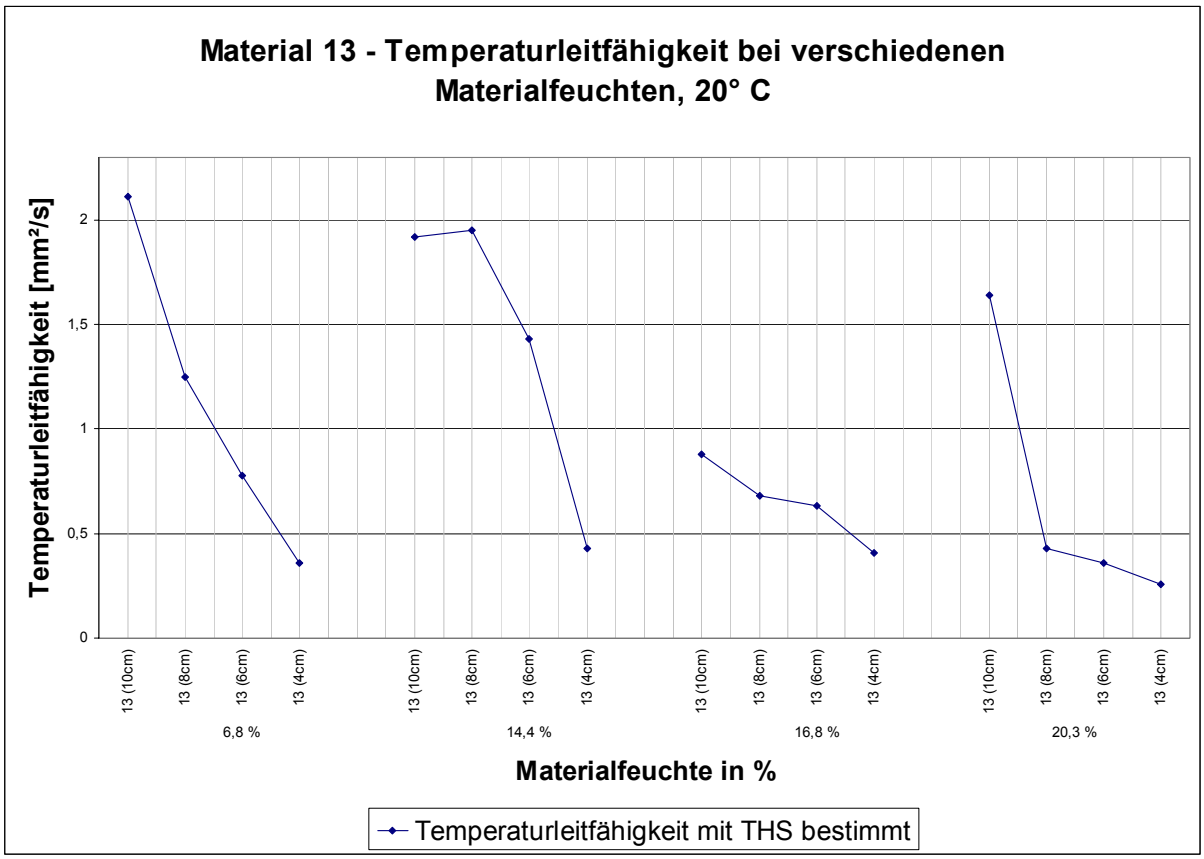
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,043 (10 cm) 0,0472 (8 cm) 0,052 (6 cm) 0,0598 (4 cm)	16,8	29,23 36,54 48,71 73,07

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0499 (10 cm) 0,0491 (8 cm) 0,0526 (6 cm) 0,0563 (4 cm)	20,3	33,26 41,57 55,43 83,14




Material 13 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
13 (10cm)
13 (8cm)
13 (6cm)
13 (4cm)
6,8 %
14,4 %
16,8 %
20,3 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 14:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Cellulose-Flocken		C	Keine Angabe	Keine Angabe

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0422 (10 cm) 0,0484 (8 cm) 0,0606 (6 cm) 0,0544 (4 cm)	5,9	25,12 31,4 41,87 62,8

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

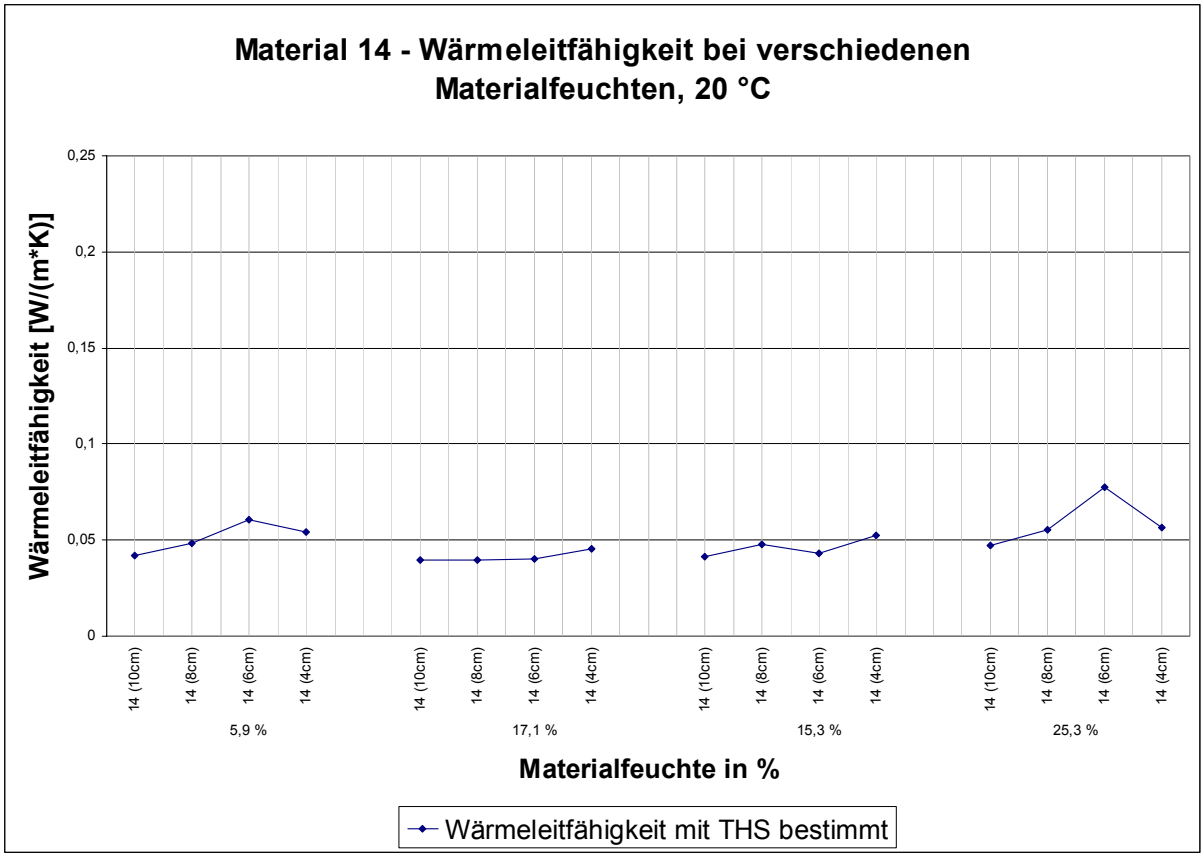
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0398 (10 cm) 0,0397 (8 cm) 0,0404 (6 cm) 0,0455 (4 cm)	17,1	29 36,26 48,34 72,52

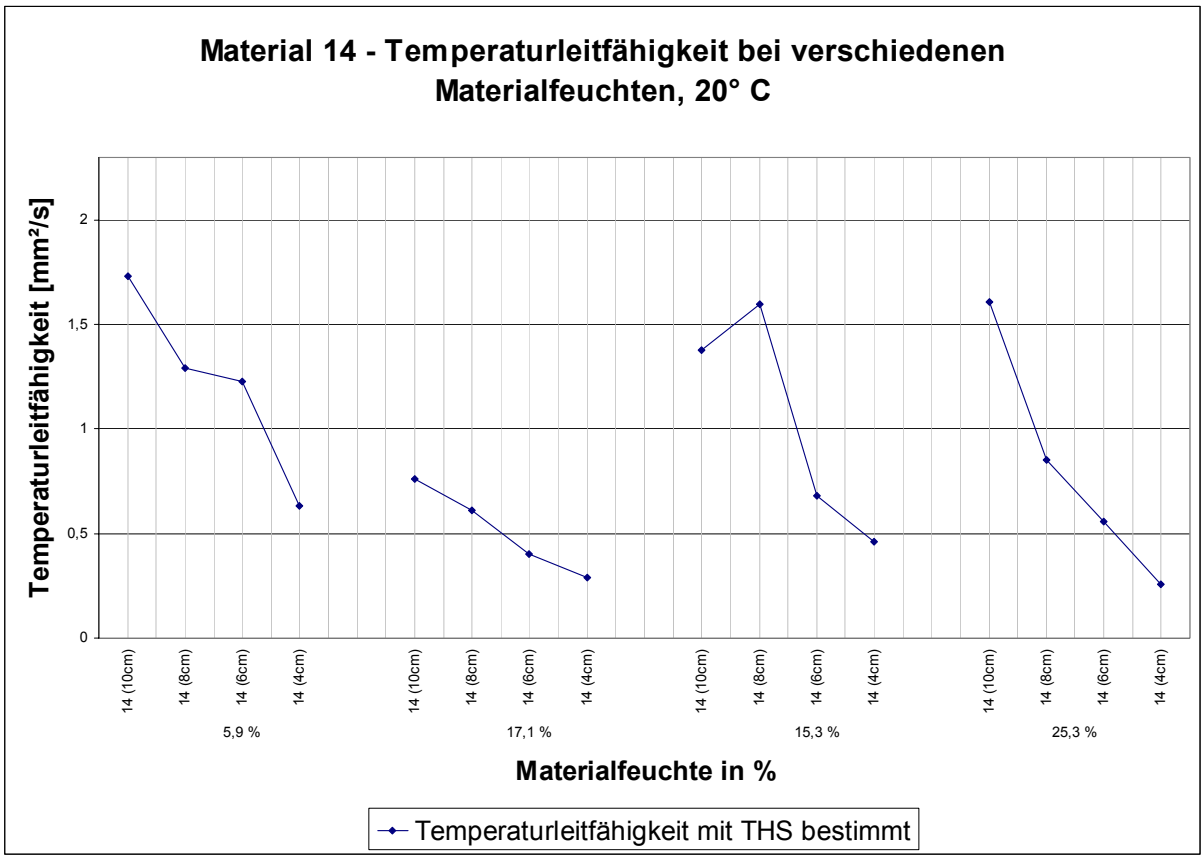
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0412 (10 cm) 0,0479 (8 cm) 0,0433 (6 cm) 0,0525 (4 cm)	20,6	28,34 35,43 47,24 70,86

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,047 (10 cm) 0,0553 (8 cm) 0,0773 (6 cm) 0,0567 (4 cm)	25,3	33,43 41,78 55,71 83,57




Material 14 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
14 (10cm)
14 (8cm)
14 (6cm)
14 (4cm)
5,9 %
17,1 %
15,3 %
25,3 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 15:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Cellulose-Flocken		P	25-65	0,039

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0408 (10 cm) 0,0406 (8 cm) 0,0484 (6 cm) 0,0649 (4 cm)	0,3	20,92 31,15 34,87 52,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

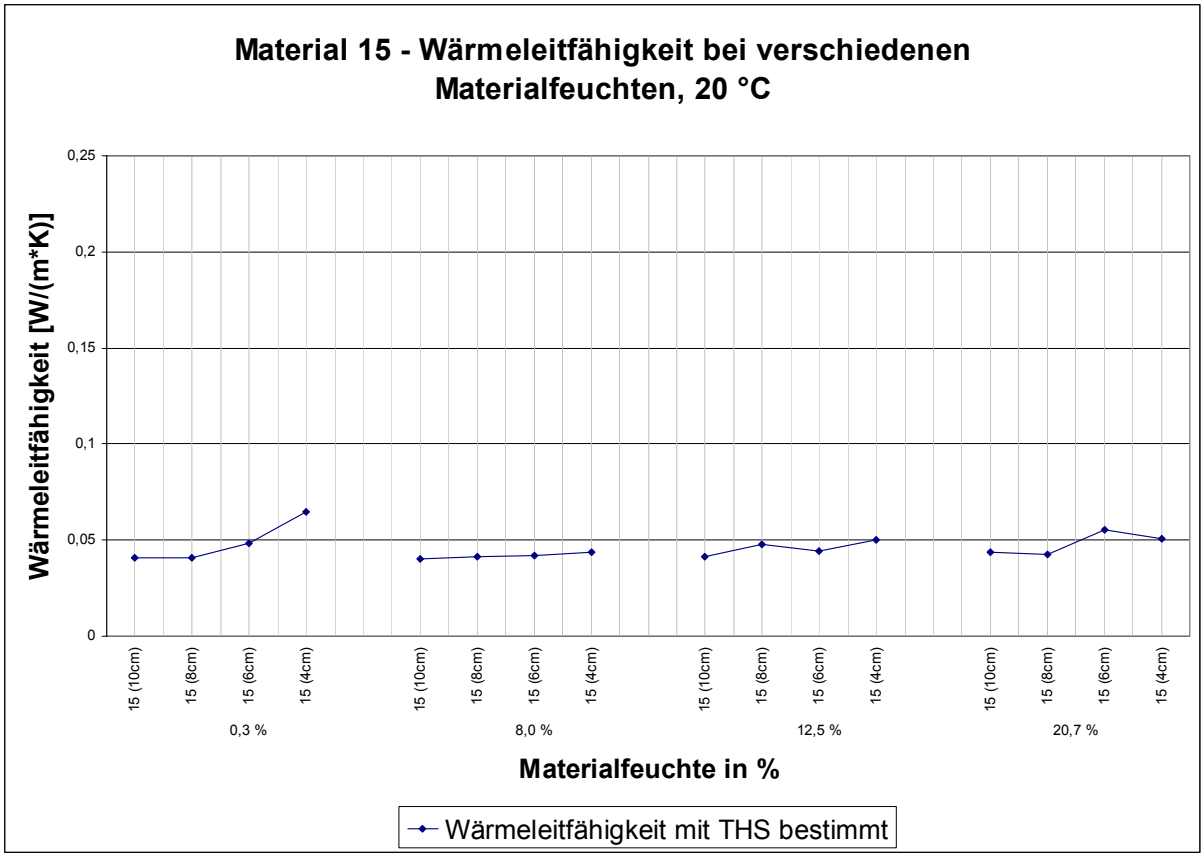
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0402 (10 cm) 0,0416 (8 cm) 0,0422 (6 cm) 0,0436 (4 cm)	8,0	21,89 27,36 36,48 54,73

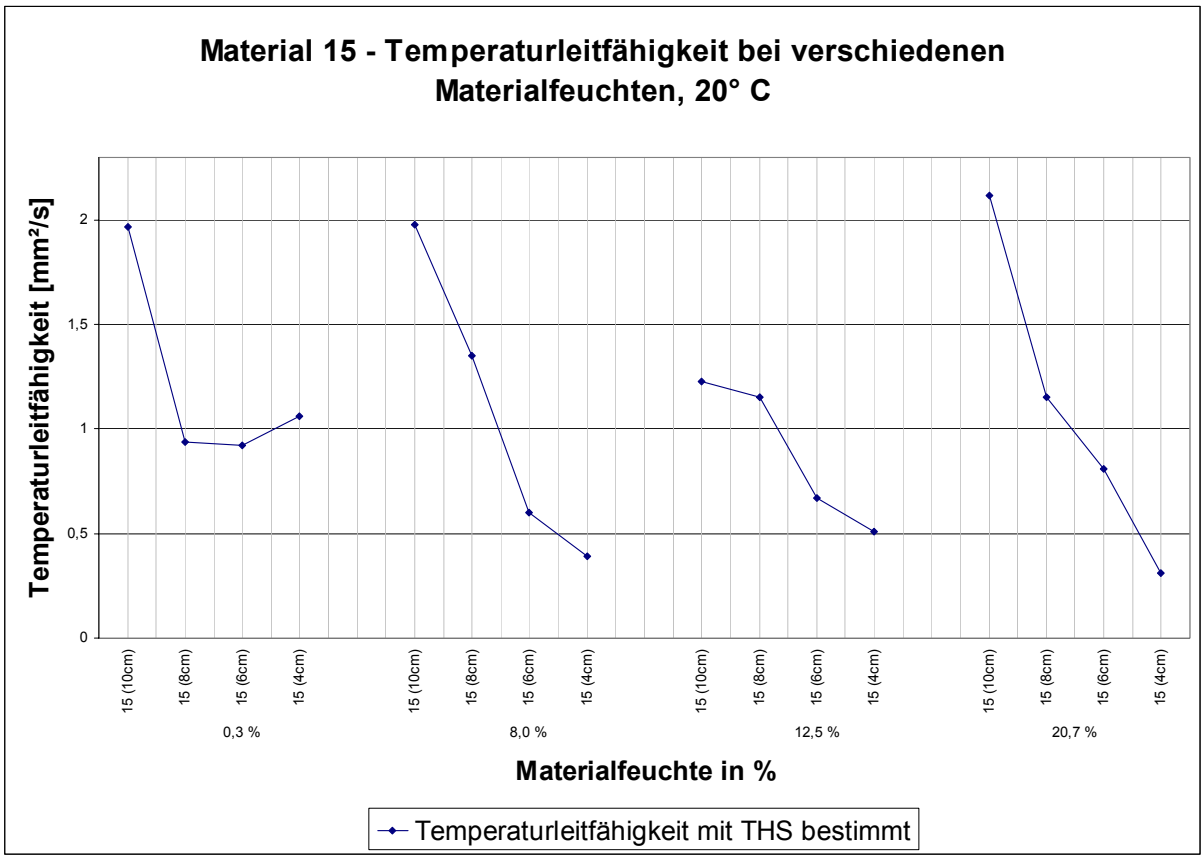
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0413 (10 cm) 0,0479 (8 cm) 0,0445 (6 cm) 0,0502 (4 cm)	12,5	22,03 27,54 36,71 55,07

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0435 (10 cm) 0,0425 (8 cm) 0,0554 (6 cm) 0,0505 (4 cm)	20,5	31,89 39,86 53,15 79,72




Material 15 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
15 (10cm)
15 (8cm)
15 (6cm)
15 (4cm)
0,3 %
8,0 %
12,5 %
20,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 16:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Hanf-Fasern		WKI	Keine Angabe	

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0413 (10 cm) 0,0511 (8 cm) 0,0609 (6 cm) 0,0769 (4 cm)	0	26,32 32,9 43,87 65,8

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0423 (10 cm) 0,0461 (8 cm) 0,0471 (6 cm) 0,0503 (4 cm)	8,2	28,63 35,79 47,72 71,58

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0696 (10 cm) 0,0653 (8 cm) 0,0909 (6 cm) 0,0832 (4 cm)	11,4	33,63 42,04 56,05 84,07

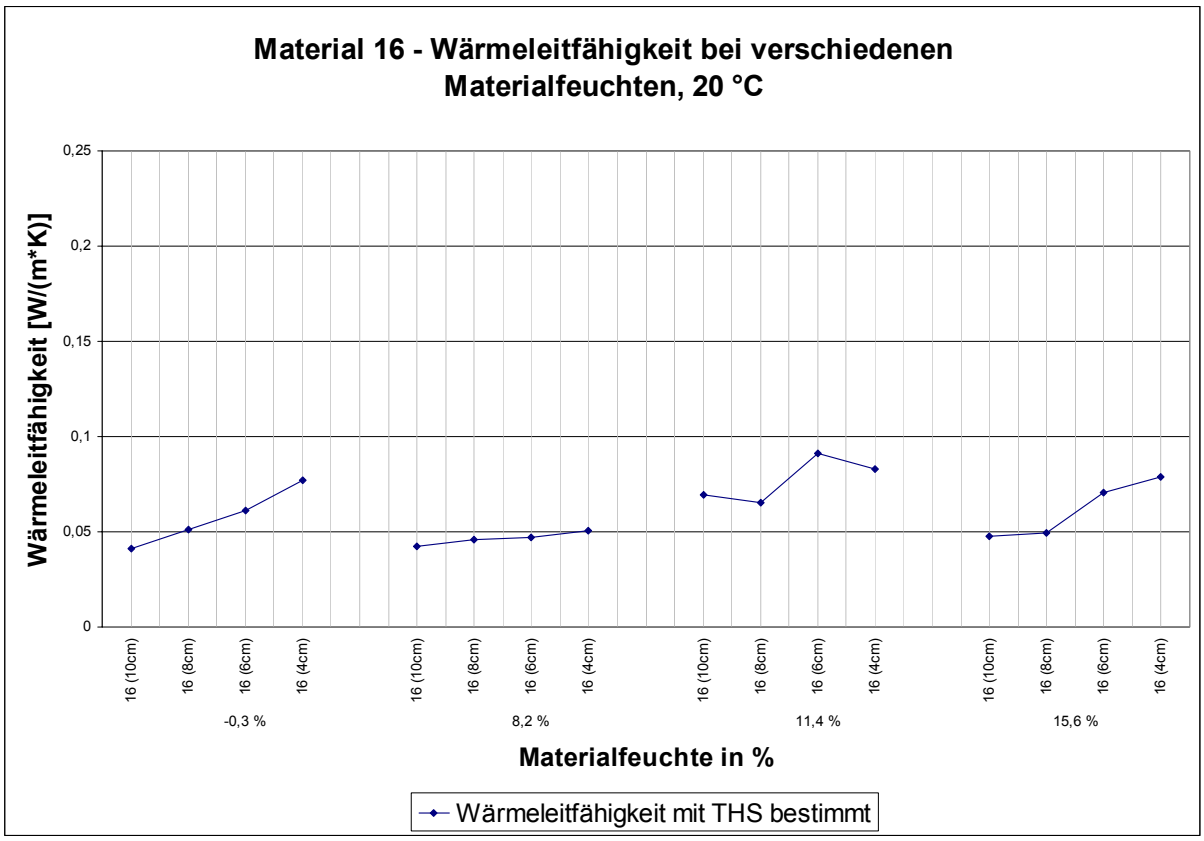
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

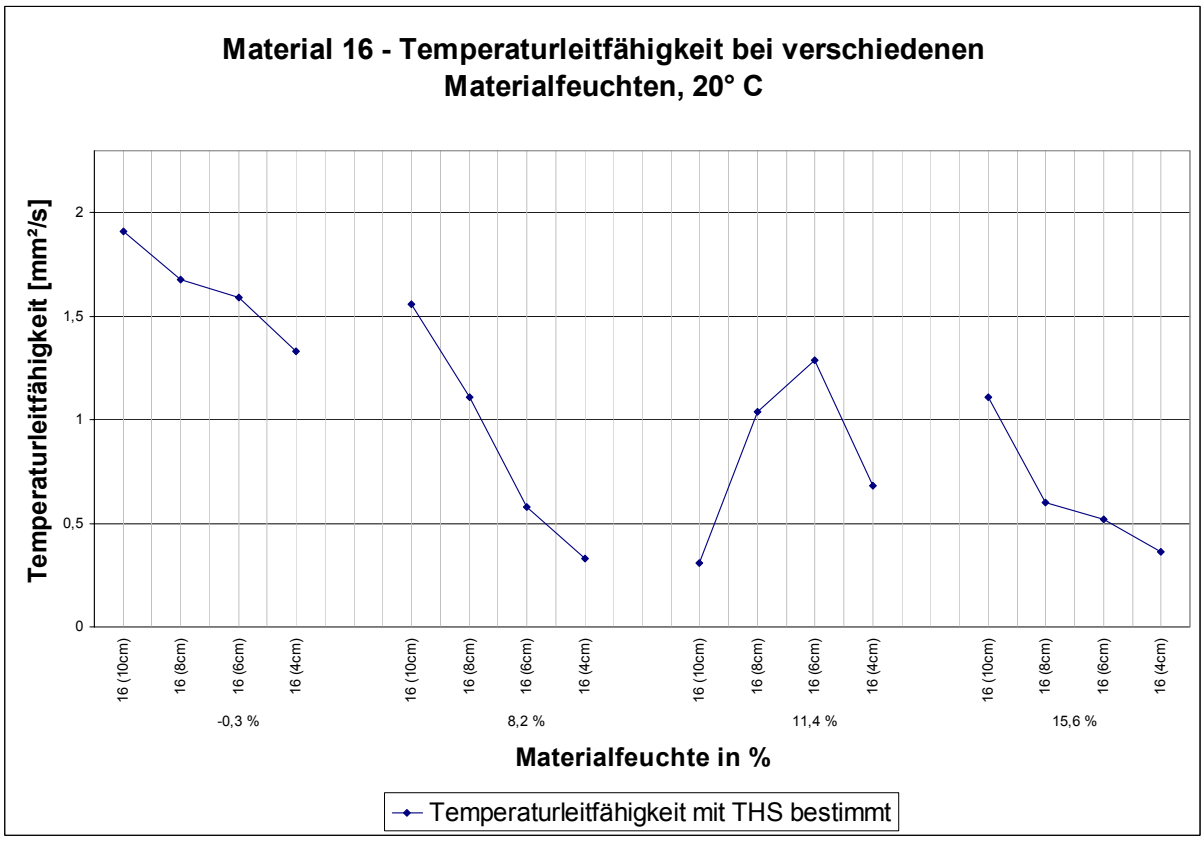
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0477 (10 cm) 0,0496 (8 cm) 0,0707 (6 cm) 0,0786 (4 cm)	15,6	44,62 55,78 74,37 111,56

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 16: Hanf-Fasern
Dichte (Kg/m^3): 37,5 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 12 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0456	0,0451
10	0,0465	
23	0,0487	


Material 16 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
16 (10cm)
16 (8cm)
16 (6cm)
16 (4cm)
-0,3 %
8,2 %
11,4 %
15,6 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 16 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
16 (10cm)
16 (8cm)
16 (6cm)
16 (4cm)
-0,3 %
8,2 %
11,4 %
15,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 17:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Mineralfaser-Platten		AA	25	0,04

Referenzmaterial

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,031[8]	1,8	15

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,032	0,7	13,7

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,032	3,8	15,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

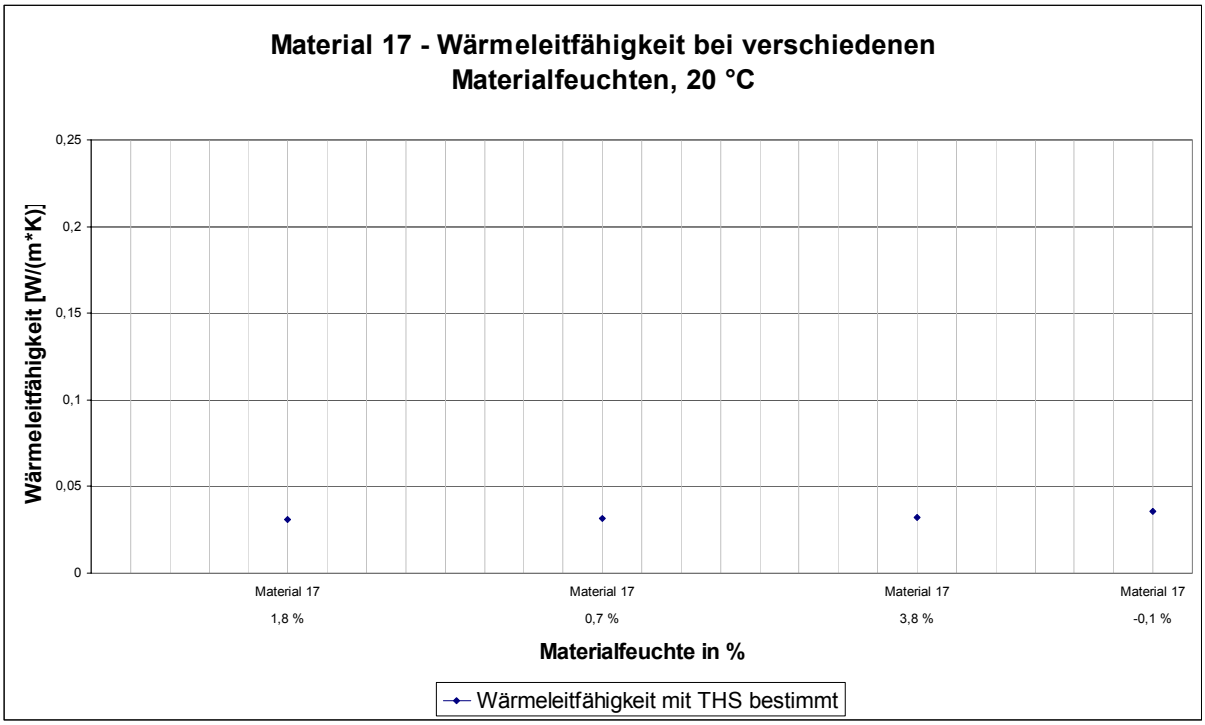
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0358	0	15

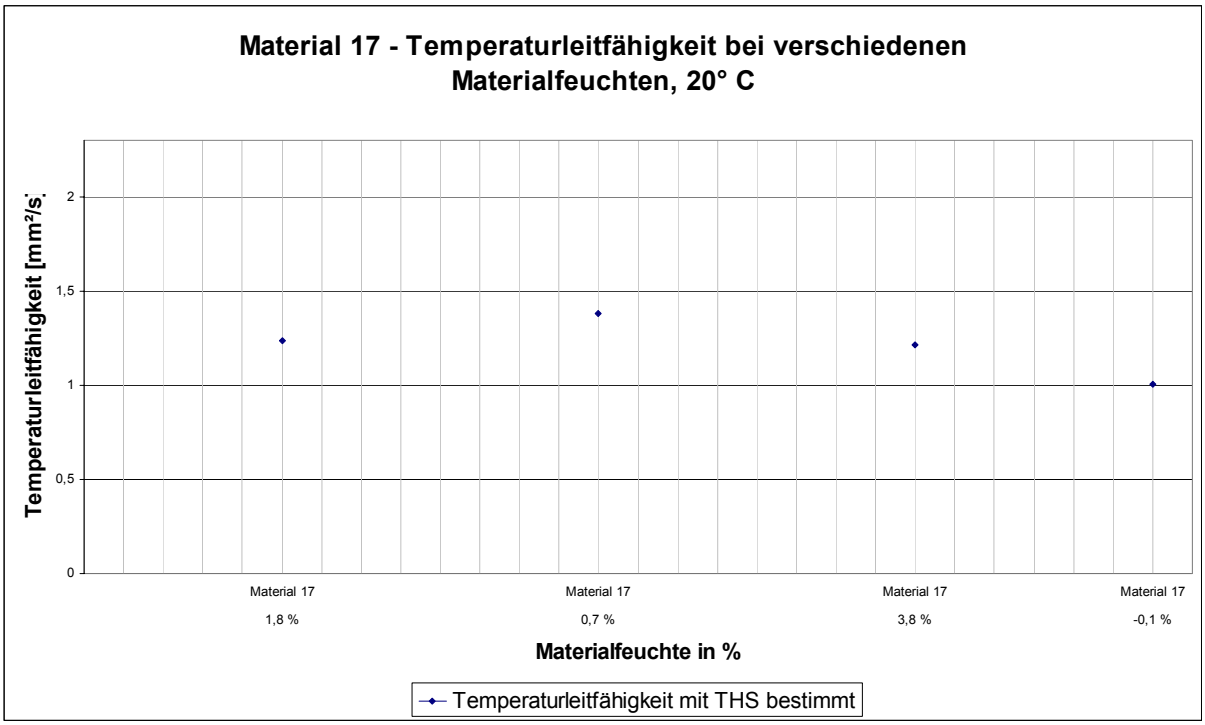
[8] Material wurde nicht mit 3 Nm Anpressdruck eingestellt, sondern auf je 11 cm zusammengedrückt.

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 17 Mineralfaser-Platten
Dichte (Kg/m^3): 18,6 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 20 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0393	0,0411
10	0,0416	
23	0,0429	




Material 17 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 17
1,8 %
Material 17
0,7 %
Material 17
3,8 %
Material 17
-0,1 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 18:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Faserplatten		Y	270	0,049

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,081	6,6	266,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

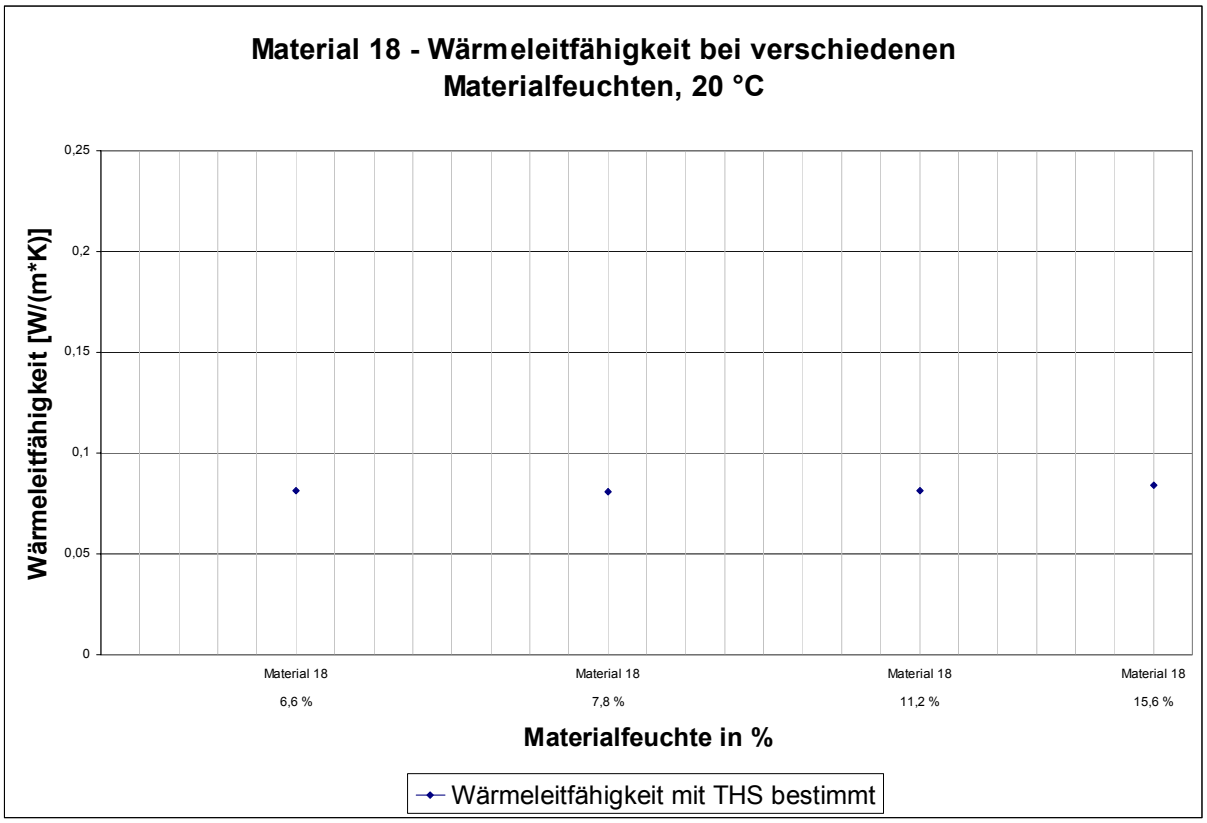
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,081	7,8	270

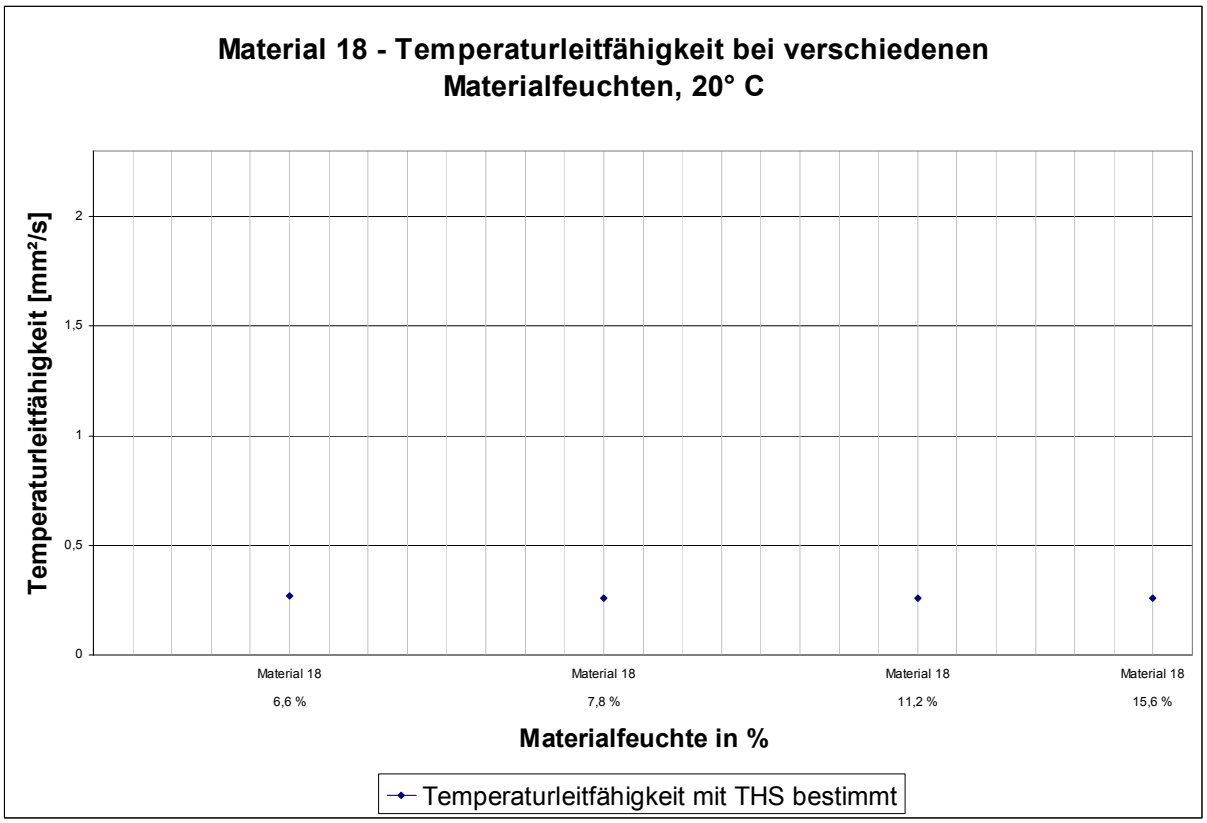
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,082	11,2	279

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0841	15,6	290


Material 18 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 18
6,6 %
Material 18
7,8 %
Material 18
11,2 %
Material 18
15,6 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 18 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 18
6,6 %
Material 18
7,8 %
Material 18
11,2 %
Material 18
15,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 19:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Faserplatten		J	260 ±20	0,051 (Nennwert) 0,061 (Rechenwert)

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,096	6,2	280

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,099	7,3	283

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,11	10,8	293

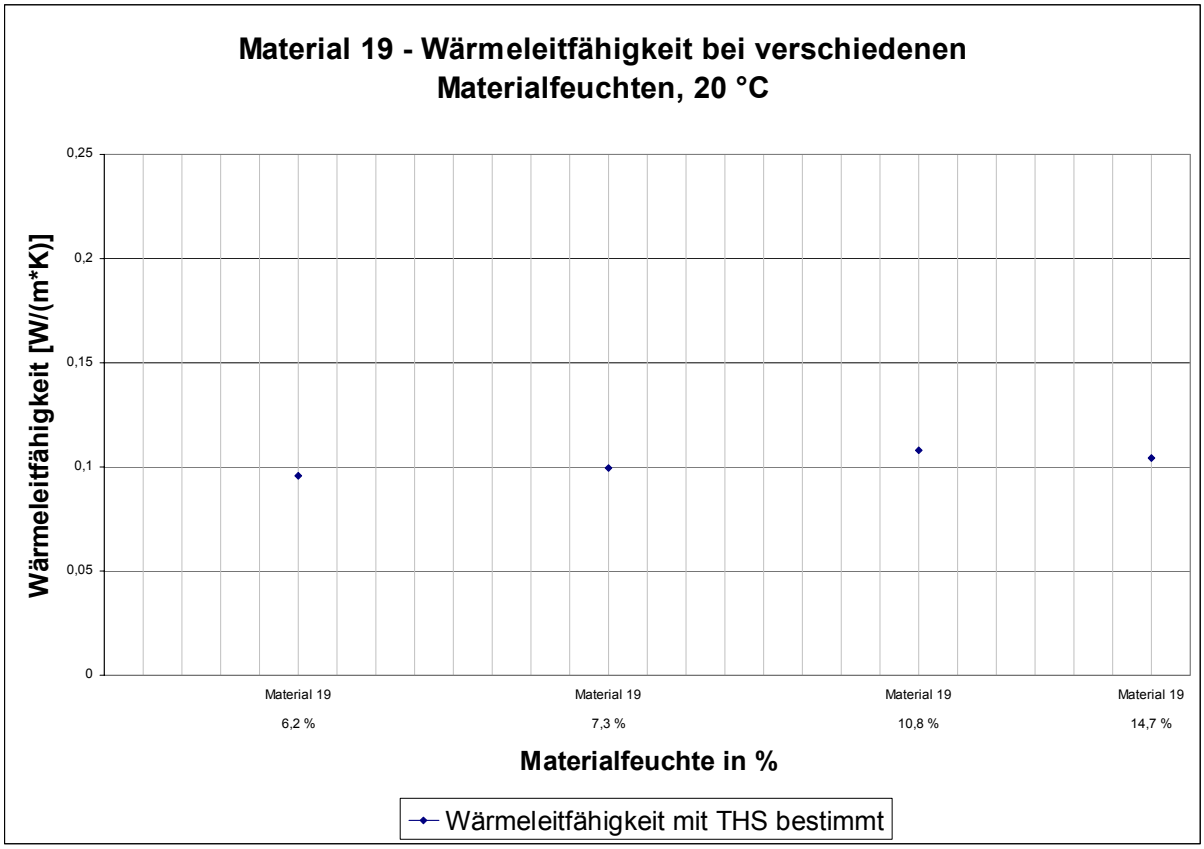
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,105	14,7	303,8

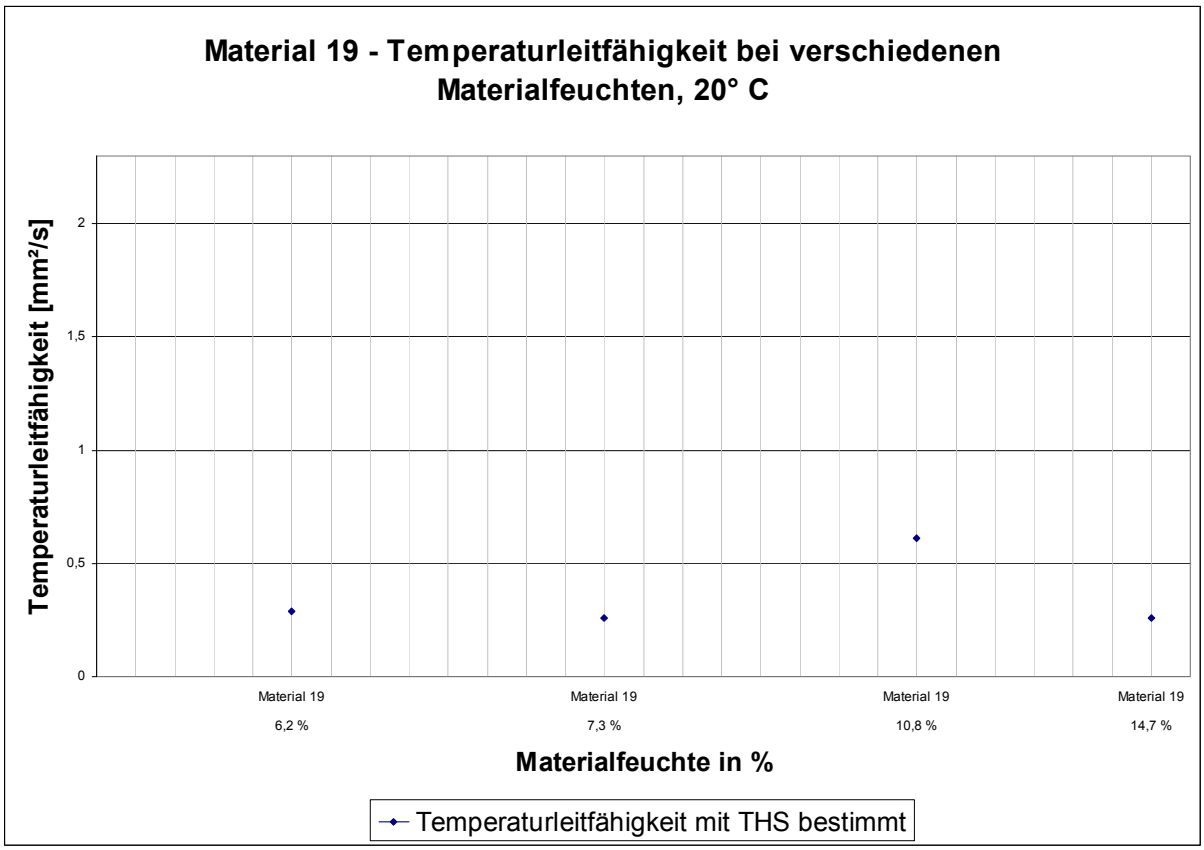
Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 19: Nadelholz-Faserplatten
Dichte (Kg/m^3): 28,1 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 23 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0512[9]	0,0451
10	0,0491	
23	0,0495	

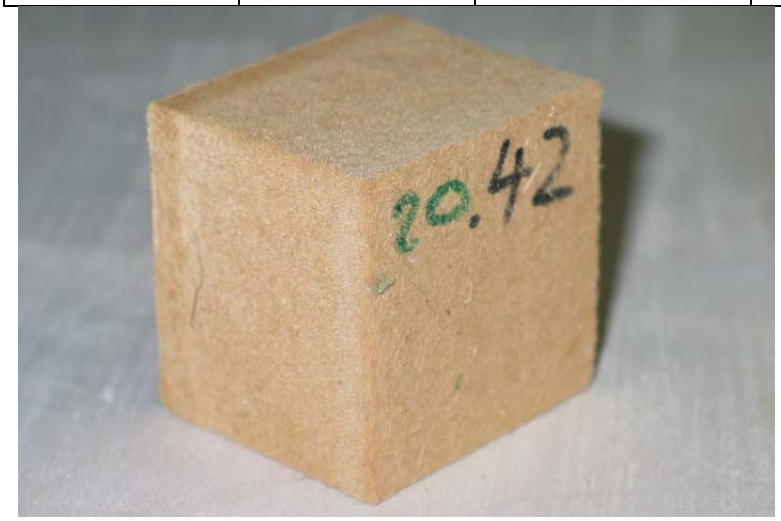


[9] Möglicherweise hat hier eine Eisbildung stattgefunden


Material 19 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 19
6,2 %
Material 19
7,3 %
Material 19
10,8 %
Material 19
14,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 20:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Faserplatten		AD	230	0,047 (Nennwert) 0,05 (Rechenwert)



Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,064 (a)[10]; 0,107 (c)	6,8	255

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,066 (a)[9]; 0,112 (c)	7,9	258

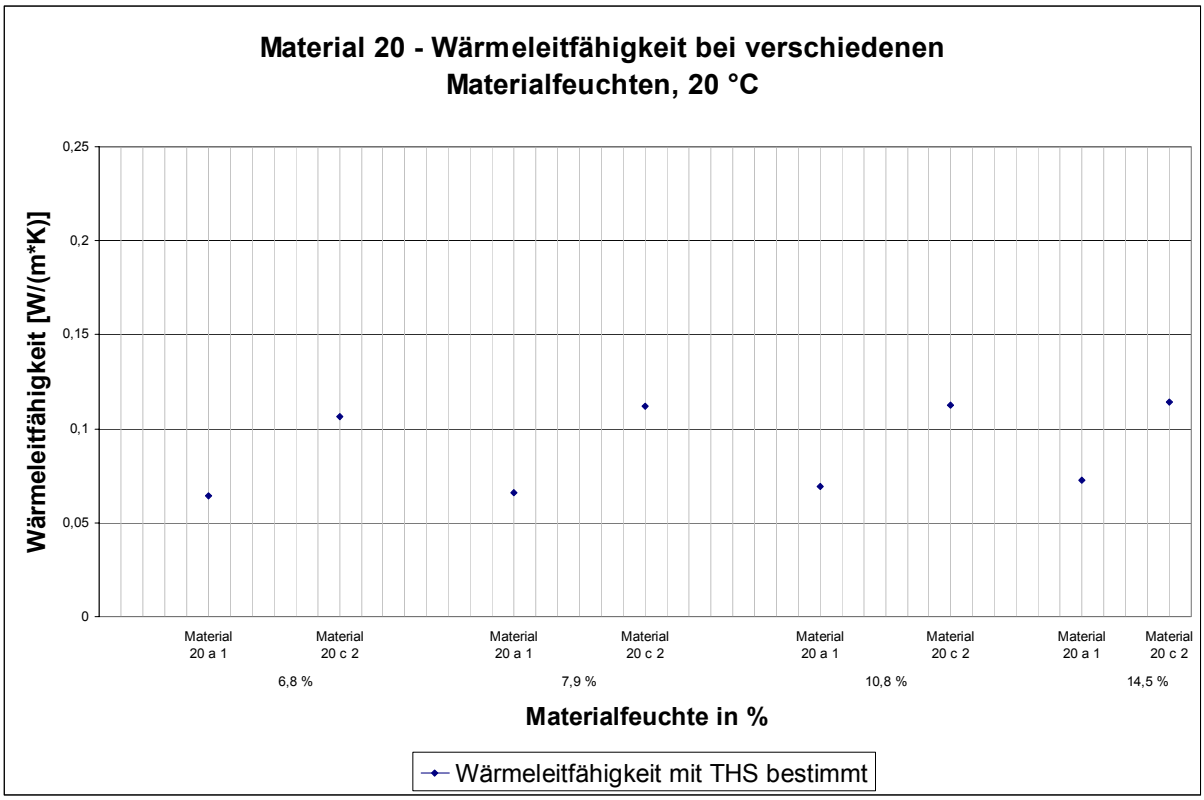
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

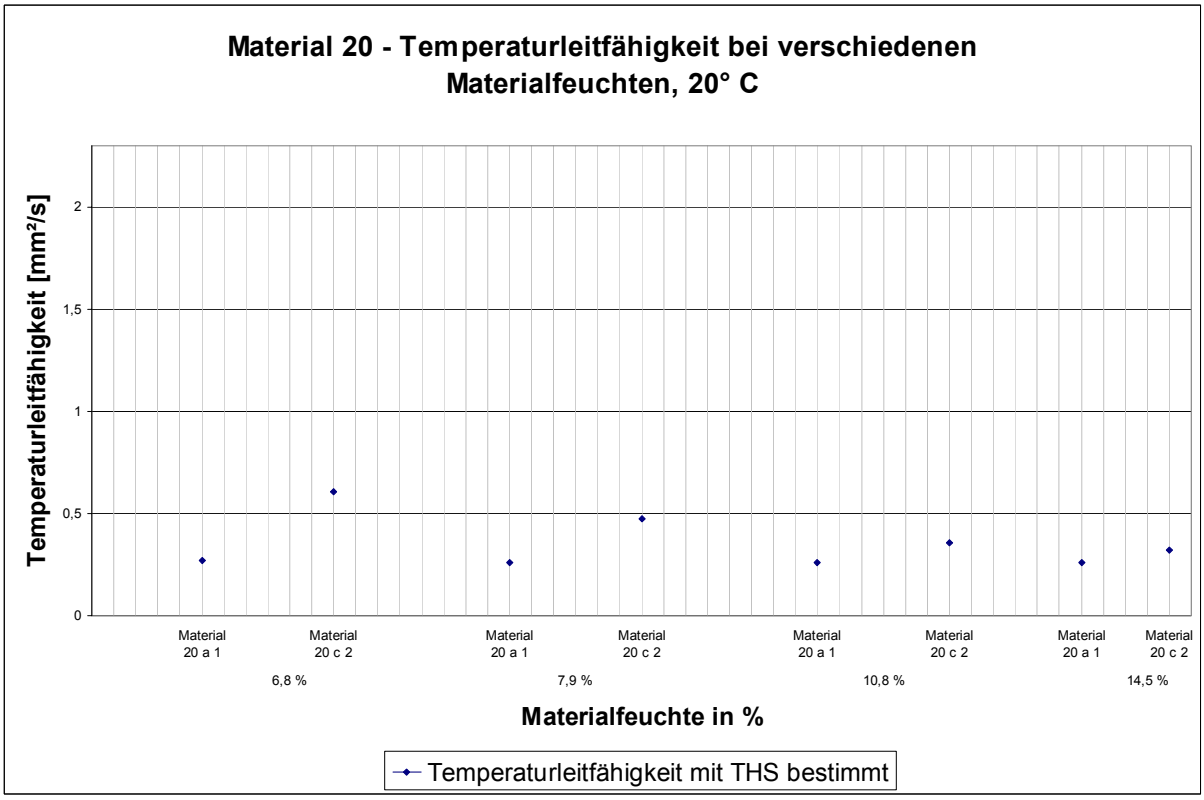
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,069 (a)[9]; 0,112 (c)	10,8	265

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0726 (a)[9]; 0,114 (c)	14,5	274

[10] (a) ist die Vorderseite mit der geringeren Dichte von ca. 200 kg/m³ und (c) die Rückseite mit einer Dichte von ca. 450 kg/m³.


Material 20 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 20 a 1
Material 20 c 2
6,8 %
7,9 %
10,8 %
14,5 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 20 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 20 a 1
Material 20 c 2
6,8 %
7,9 %
10,8 %
14,5 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 21:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Faserplatten		AD	Keine Angabe	Keine Angabe

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,103 (a)[11]; 0,061 (c); 0,0776 (e)	6,1	447

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,104 (a)[10]; 0,065 (c); 0,077 (e)	6,7	449,7

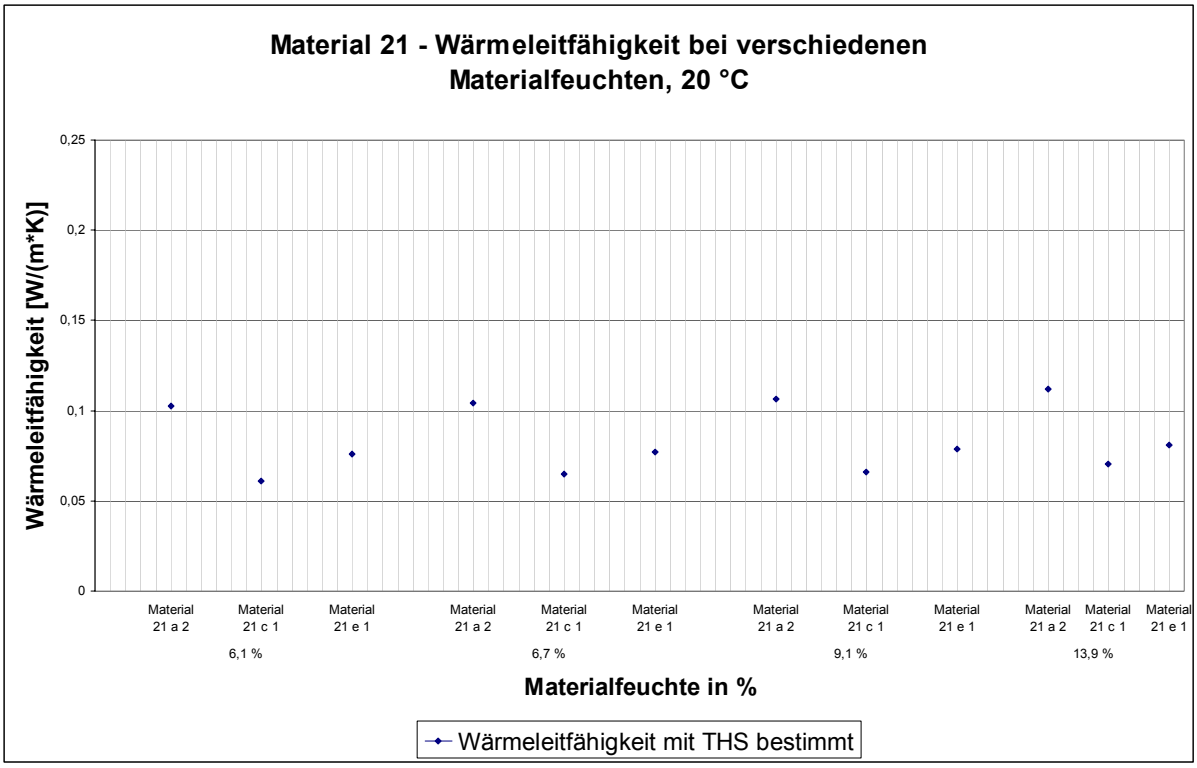
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

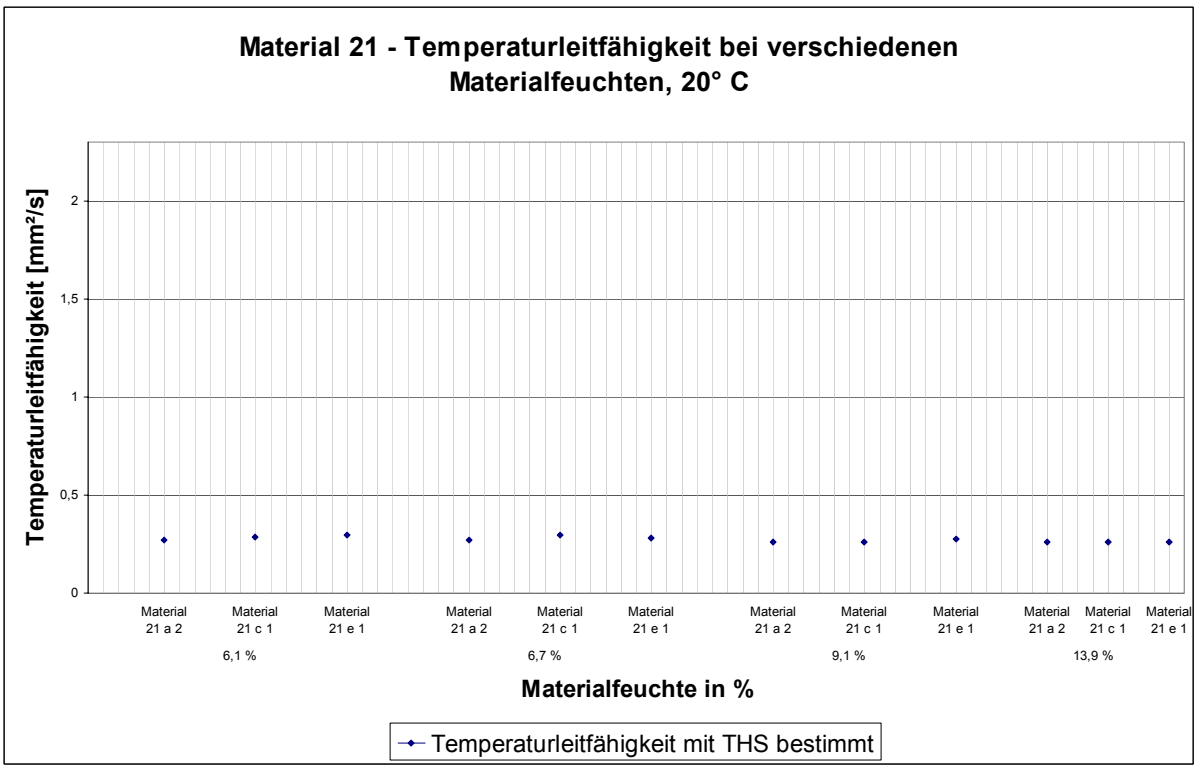
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,106 (a) [10]; 0,066 (c); 0,079 (e)	9,1	460,4

[11] (a) ist die Vorderseite (Messung innen) mit einer Dichte von ca. 680 kg/m³, (c) die Mittelschicht mit einer Dichte von ca. 300 kg/m³ und (e) die Rückseite (Messung Außenseite) mit 400 kg/m³.

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

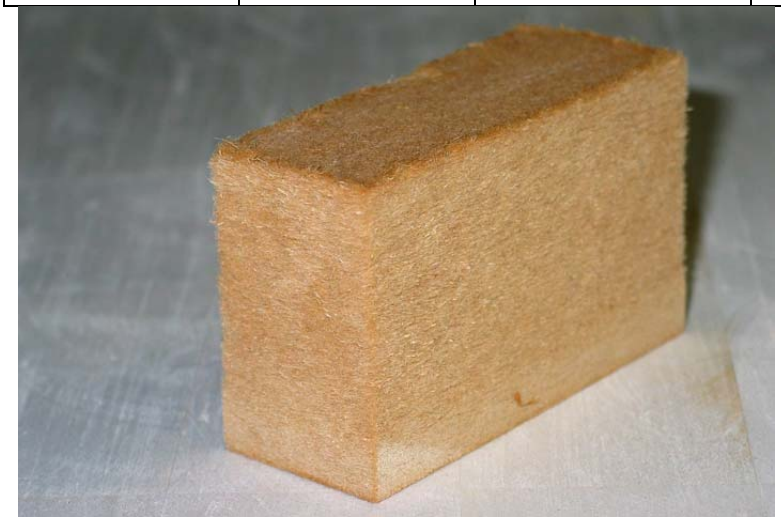
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,112 (a) [10]; 0,071 (c); 0,081 (e)	13,9	481,9





Material 22:

Dämmstoffart	**Marken-bezeichnung**	**Hersteller**	**Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]**	**Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]**
Nadelholz-Faserplatten		AD	Keine Angabe	Keine Angabe



Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,098 (a)[12]; 0,065 (c)	?	750 / 300

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,104 (a)[11]; 0,067 (c)	7,7	-

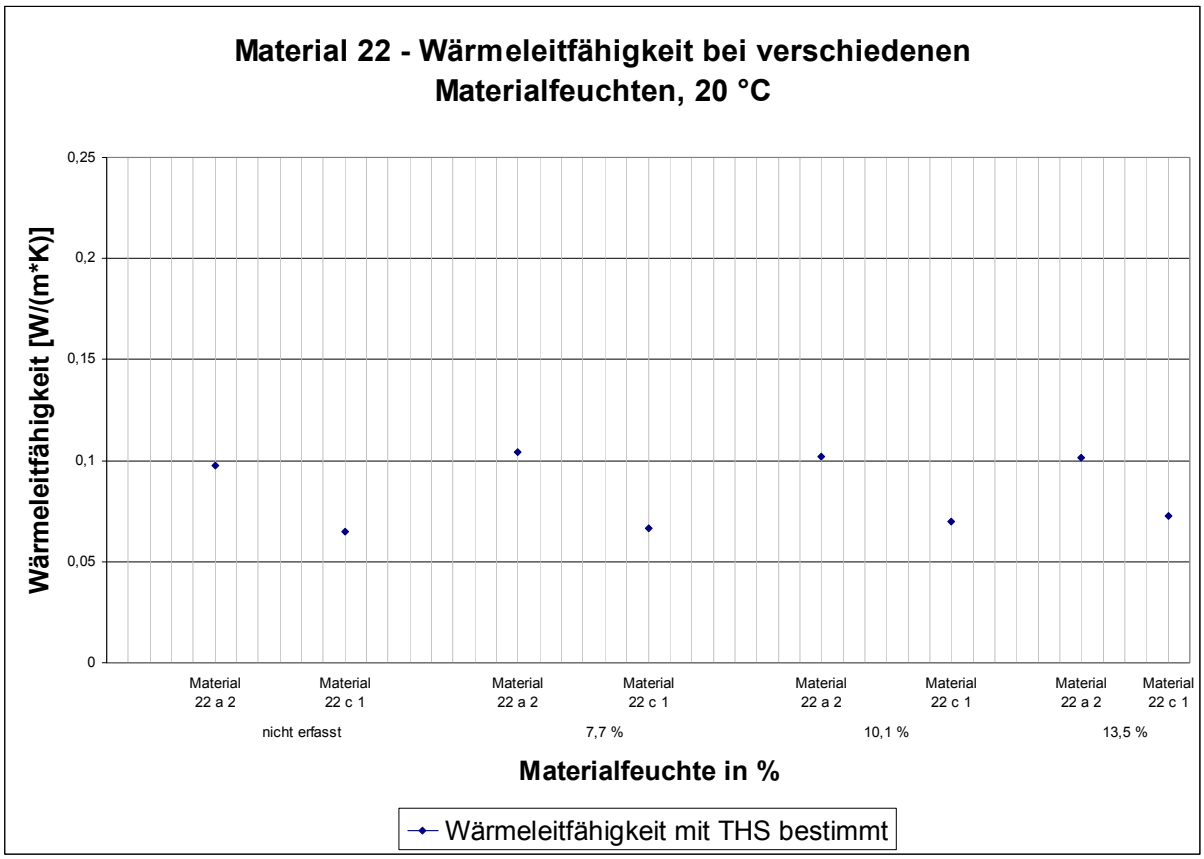
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

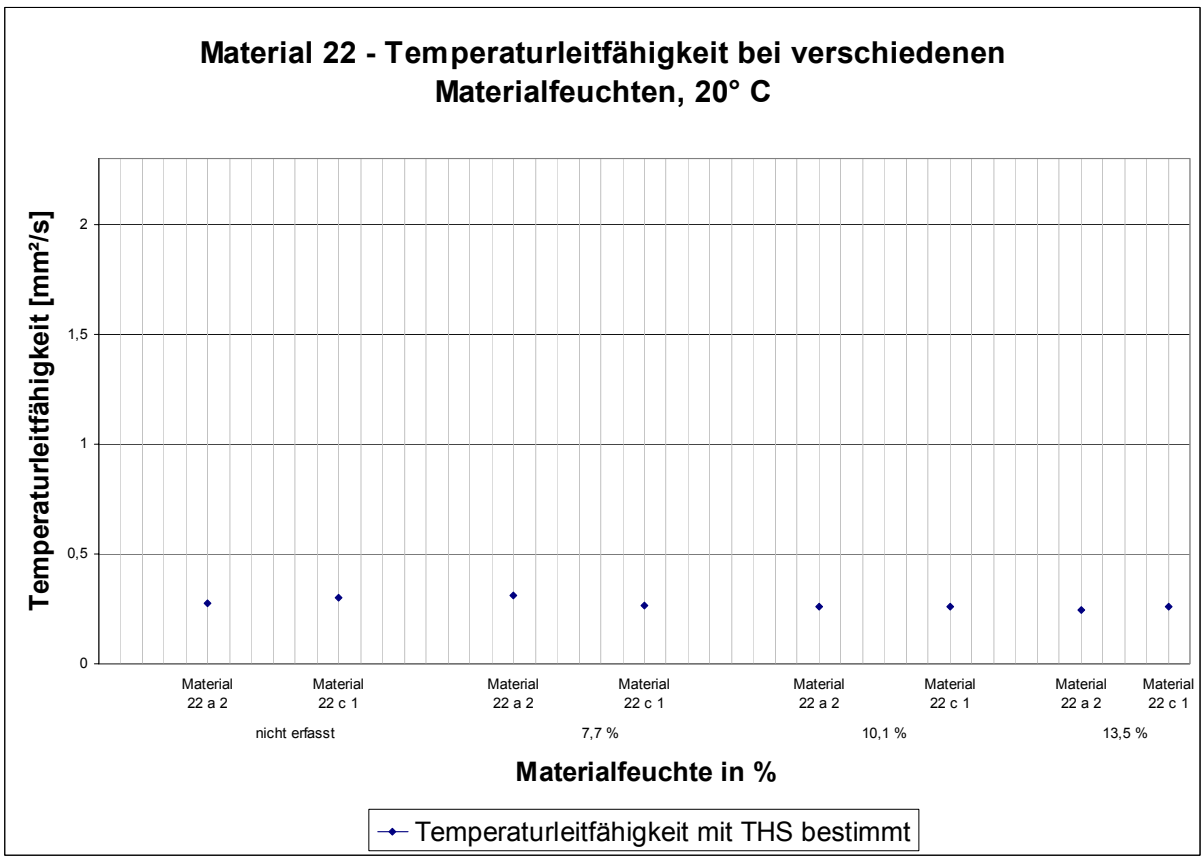
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,102 (a)[11]; 0,07 (c)	10,1	-

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,101 (a)[11]; 0,072 (c)	13,5	-

[12] (a) ist die Vorderseite (Messung innen) mit einer Dichte von ca. 750 kg/m³ und (c) die Mittelschicht mit einer Dichte von ca. 300 kg/m³.


Material 22 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 22 a 2
Material 22 c 1
nicht erfasst
7,7 %
10,1 %
13,5 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 22 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 22 a 2
Material 22 c 1
nicht erfasst
7,7 %
10,1 %
13,5 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 23:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Fasermatten		Y	45-60	0,038

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,045	6,6	45,5

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,046	7,8	46,0

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,048	11,6	47,8

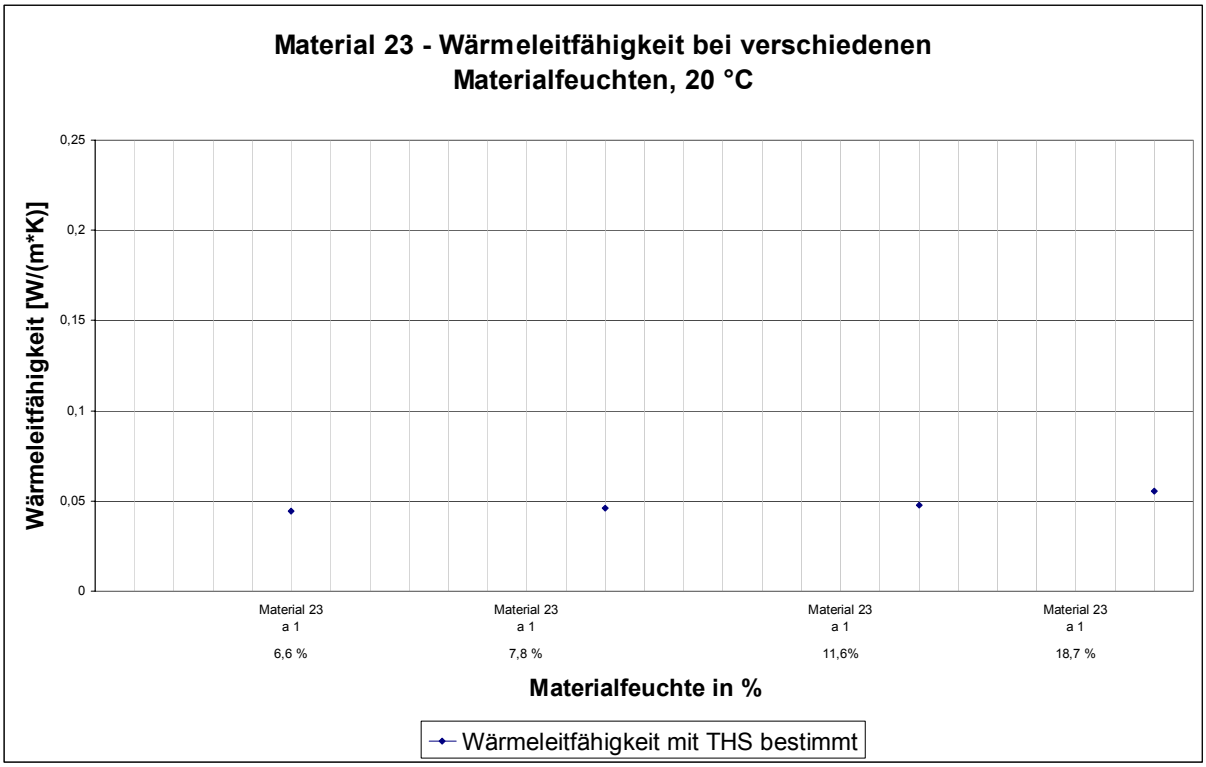
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

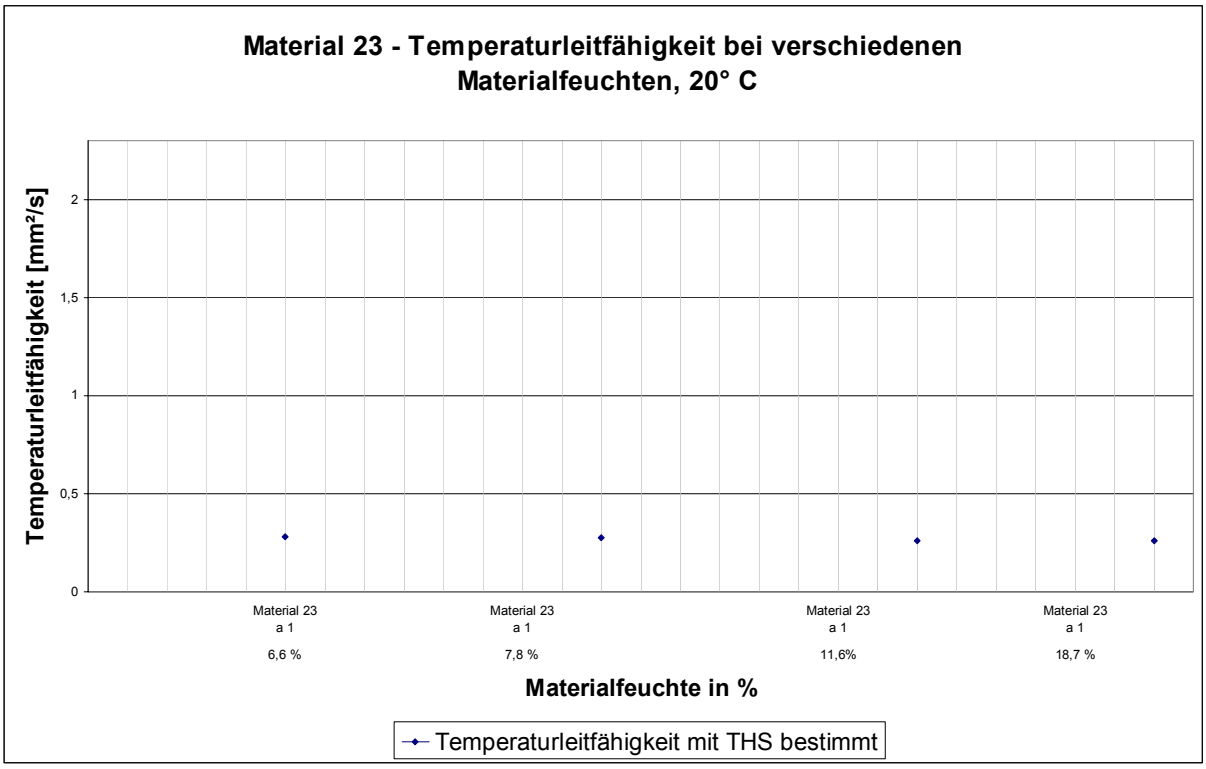
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0552	18,7	51,0

Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 23: Nadelholz-Fasermatte
Dichte (Kg/m^3): 51,7 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 19,4 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,0493	0,0501
10	0,052	
23	0,0523	




Material 23 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 23 a 1 6,6 %
Material 23 a 1 7,8 %
Material 23 a 1 11,6%
Material 23 a 1 18,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 24:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Balsa Vollholzplatten		N	30-150	0,04 - 0,37[1]

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,103	7,4	130

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,143	8,6	131,6

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,094	12,8	137,0

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

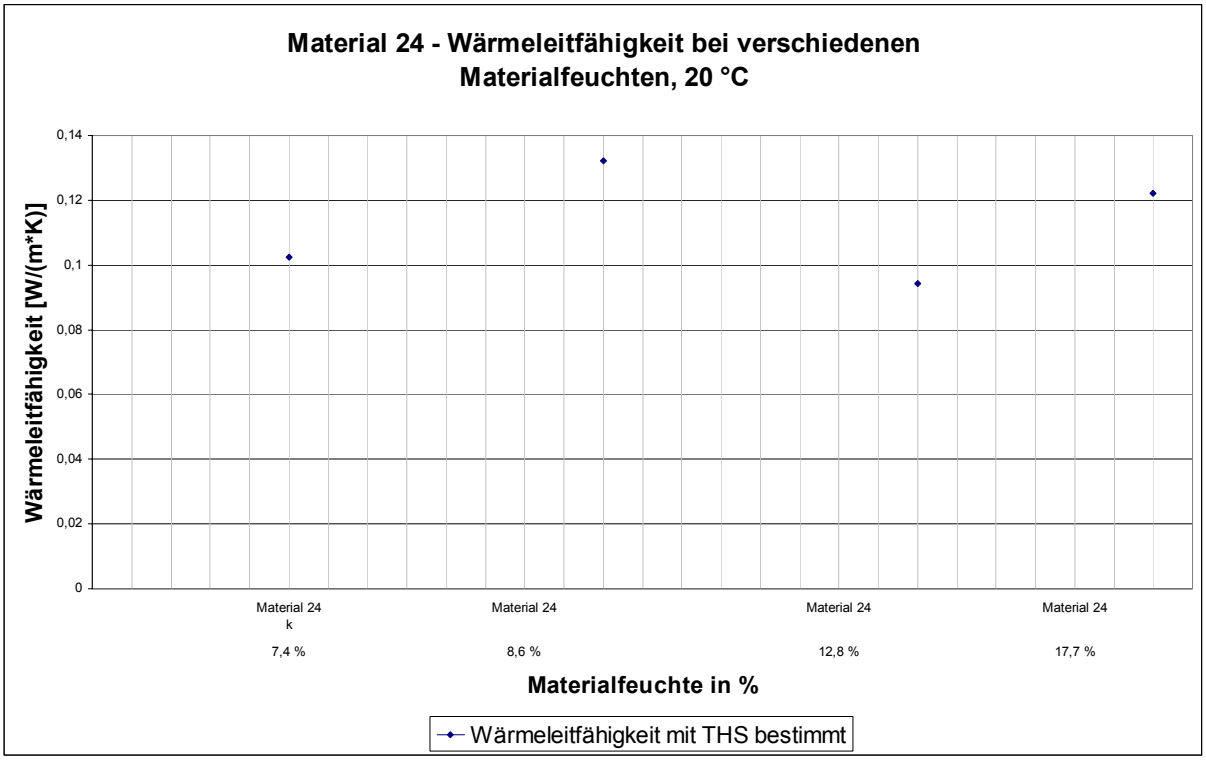
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,122	17,7	143,4

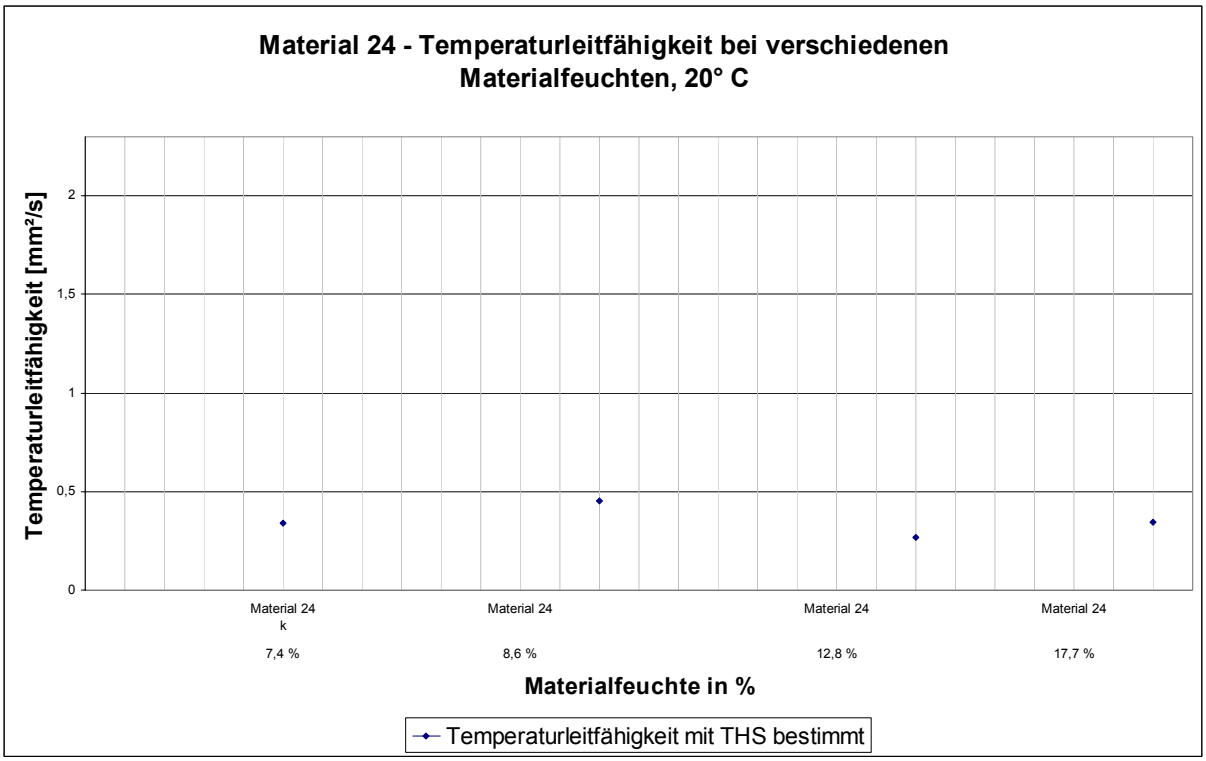
Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

Material Nr. 24: Balsa Vollholzplatte
Dichte (Kg/m^3): 166,4 Belastung: ca. 50 N (Heizplatte) Dicke: 23,66mm

Temperatur [°C]	1. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	2. Messung (50 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	3. Messung (100 N) Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]
0	0,1043	0,1079	0,1073
10	0,1077		
23	0,1085		

Die mit dem Plattenverfahren ermittelten Werte für die Wärmeleitfähigkeit stimmen gut mit den im THS – Verfahren bestimmten Werten überein.




Material 24 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 24 k
7,4 %
Material 24
8,6 %
Material 24
12,8 %
Material 24
17,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 25:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Mineralfaser-Platten		G	30	0,04

Referenzmaterial

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,031	0,7	50

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

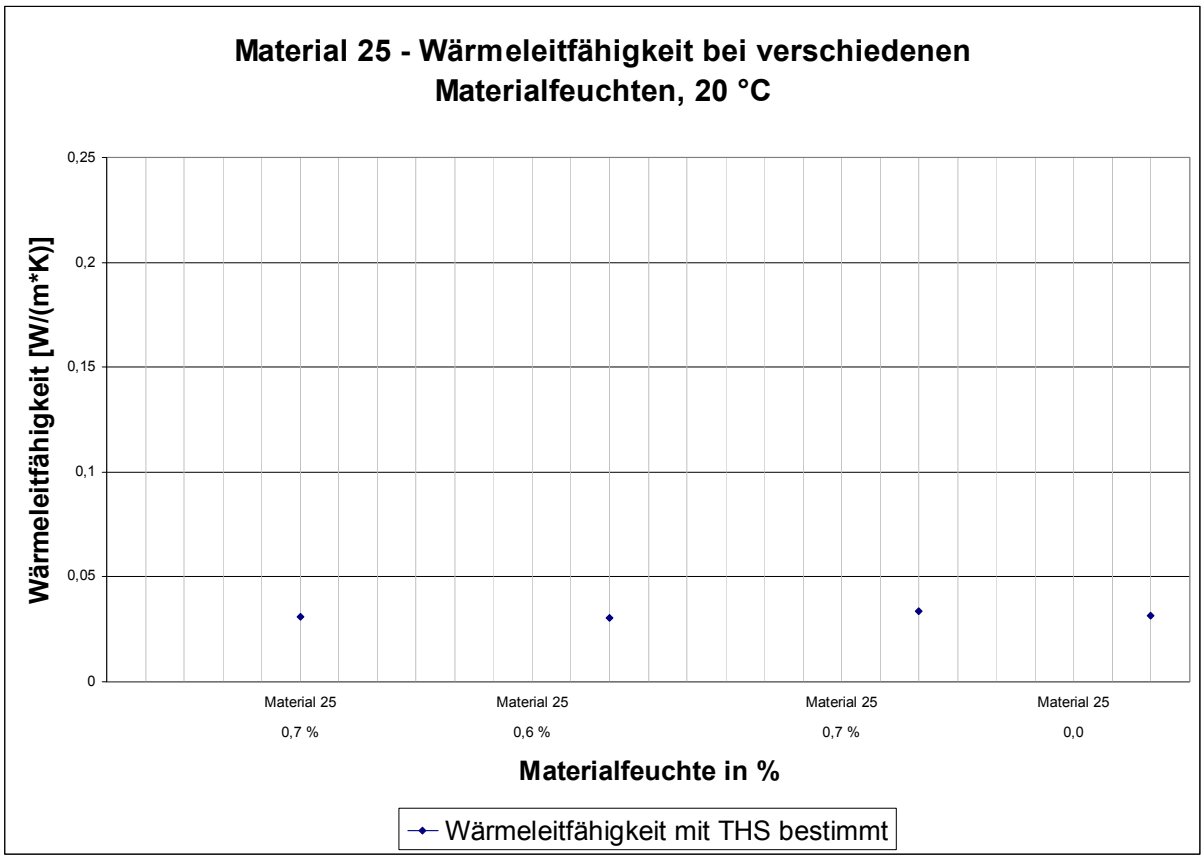
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,031	0,6	49,9

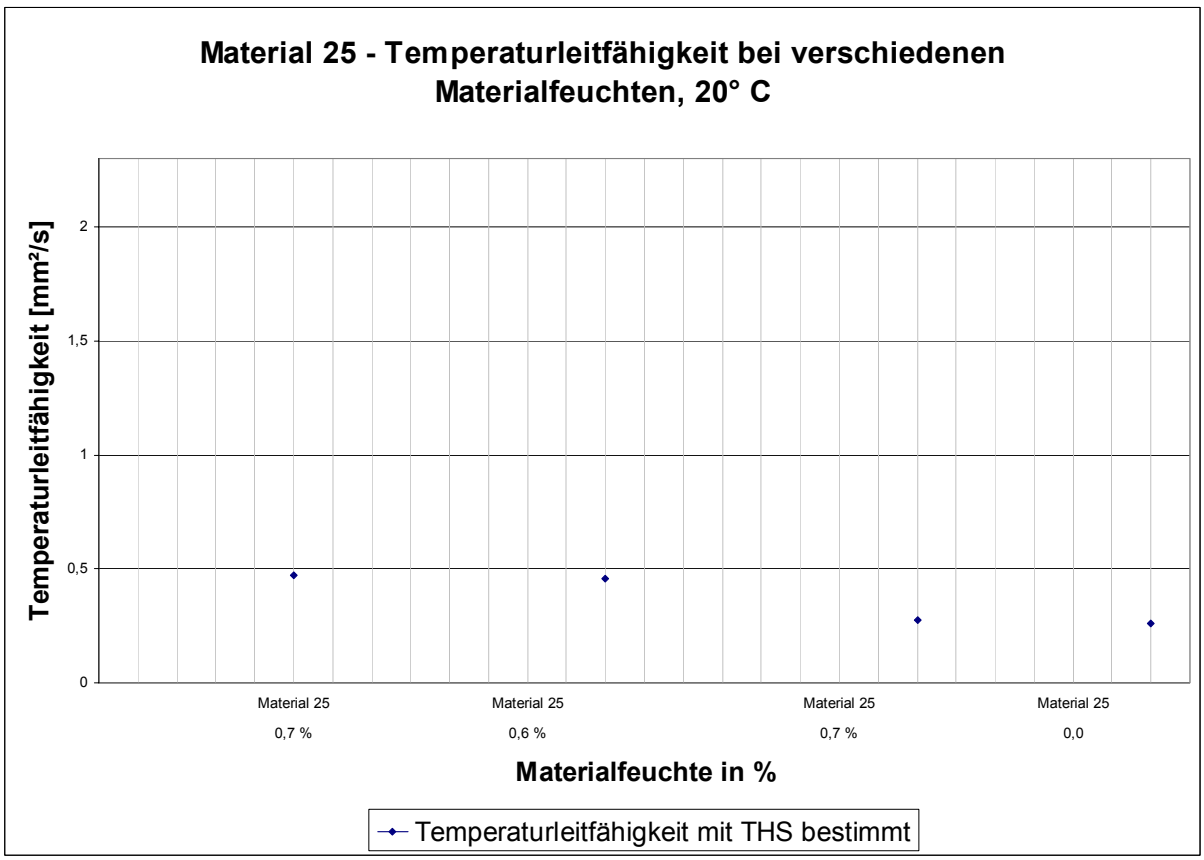
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,033	0,7	50

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,032	0	50


Material 25 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 25
0,7 %
Material 25
0,6 %
Material 25
0,7 %
Material 25
0,0
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 25 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 25
0,7 %
Material 25
0,6 %
Material 25
0,7 %
Material 25
0,0
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 26:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Roggengranulat		W	210 - 230	0,064

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,075	8,4	210

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

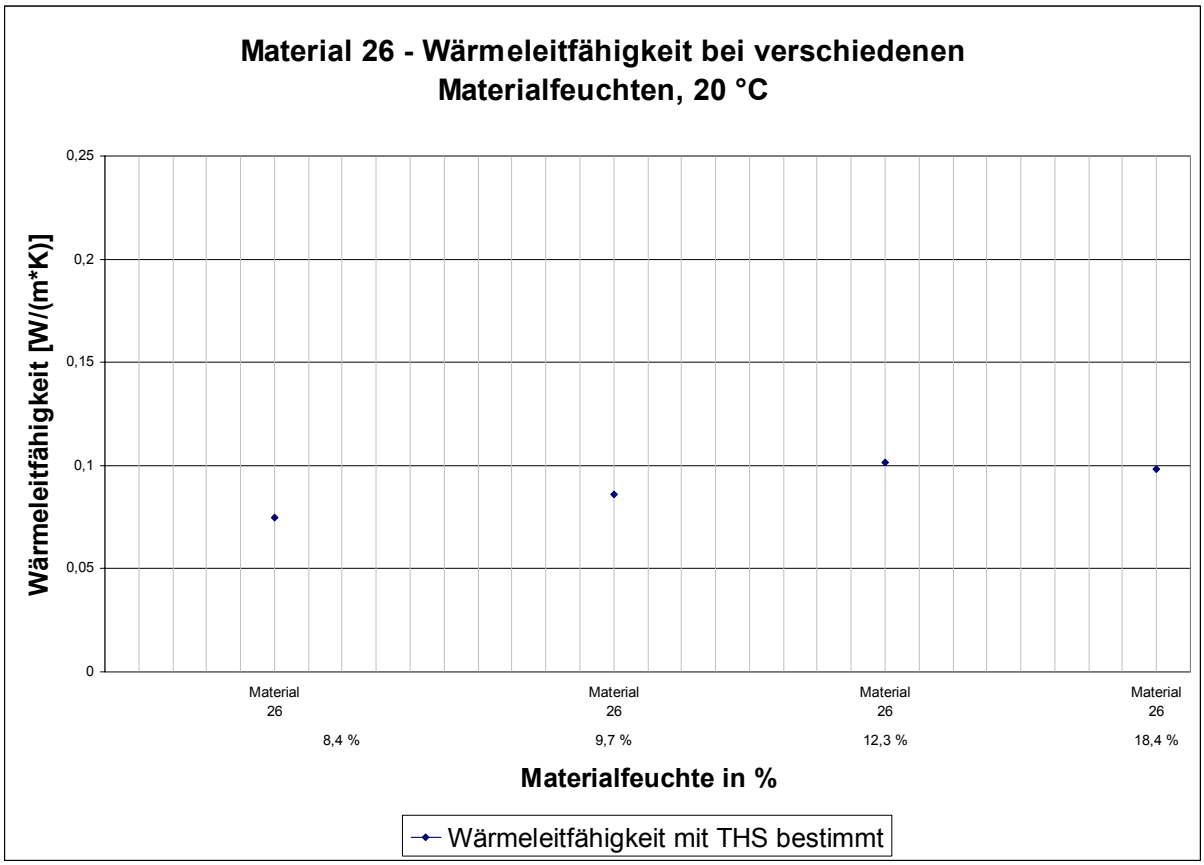
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0863	9,7	212,7

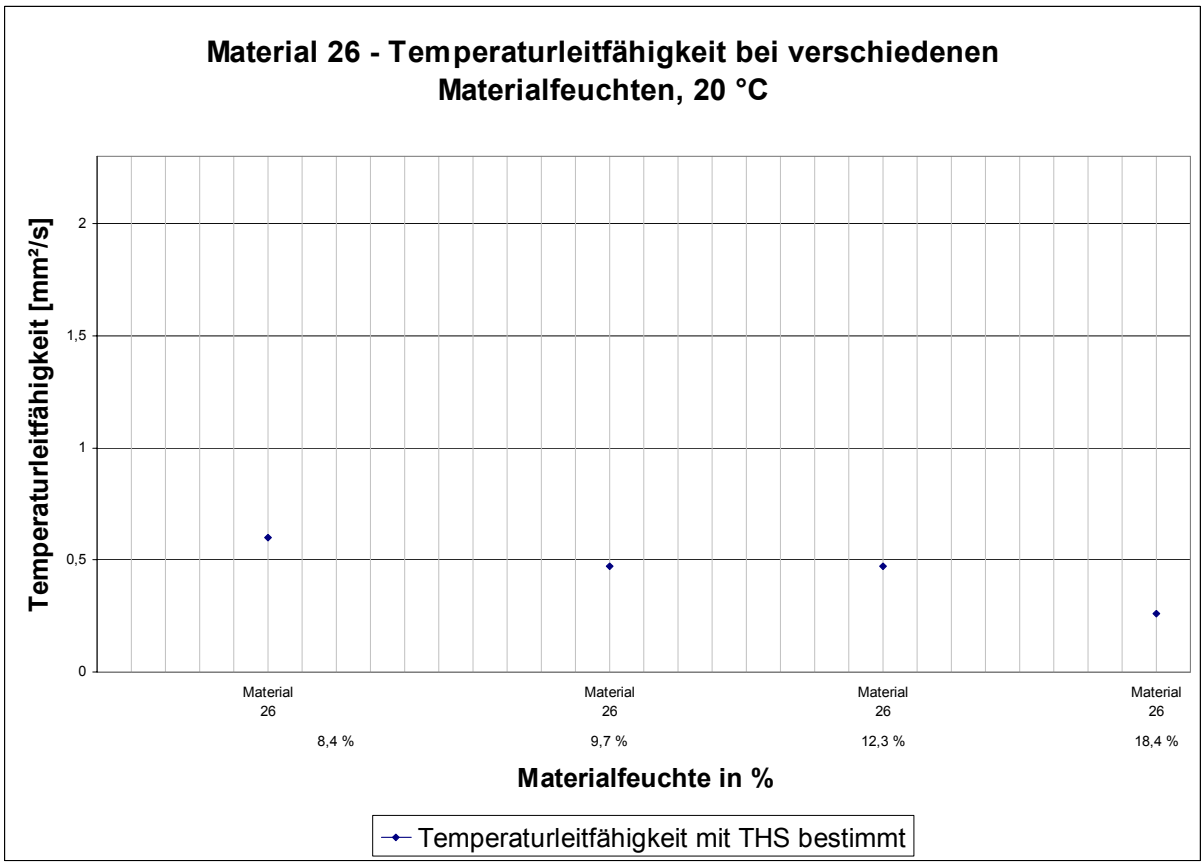
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,102	12,3	217,8

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,984	18,4	231


Material 26 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 26
8,4 %
Material 26
9,7 %
Material 26
12,3 %
Material 26
18,4 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 26 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 26
8,4 %
Material 26
9,7 %
Material 26
12,3 %
Material 26
18,4 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 27:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Roggengranulat		W	105 - 115	0,047

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,061	8,4	110

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

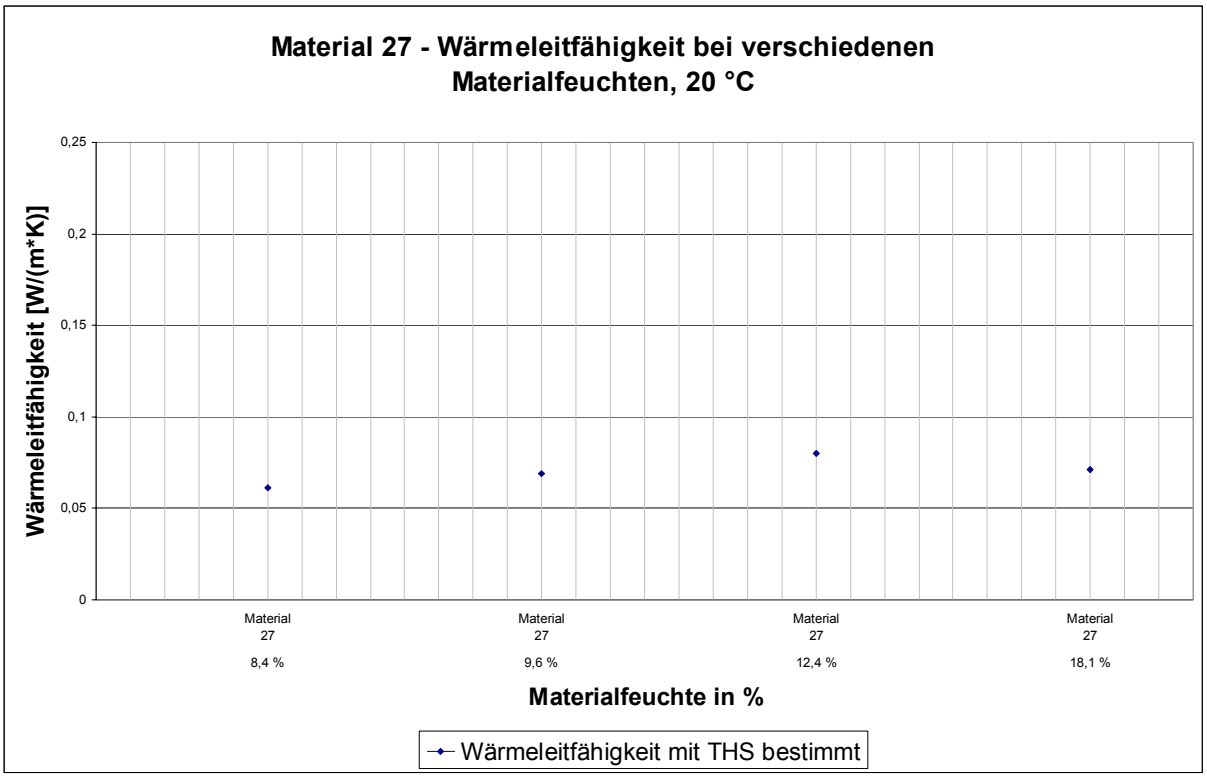
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,069	9,6	111,3

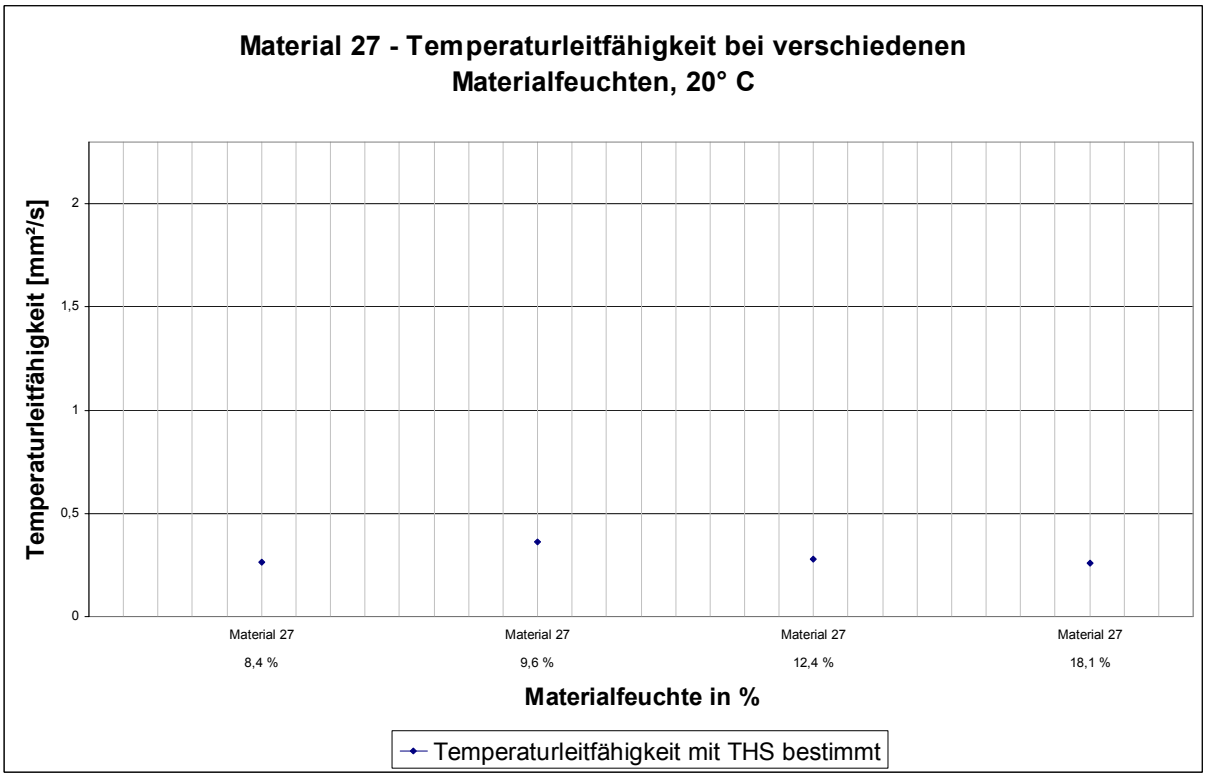
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,080	12,4	114,4

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,071	18,1	120,7


Material 27 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 27 8,4 %
Material 27 9,6 %
Material 27 12,4 %
Material 27 18,1 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 27 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 27 8,4 %
Material 27 9,6 %
Material 27 12,4 %
Material 27 18,1 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 28:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Seegras		X	70 - 80	0,045

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0464 (10 cm) 0,0428 (8 cm) 0,0458 (6 cm) 0,0469 (4 cm)	10,2	37,32 46,65 62,2 93,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

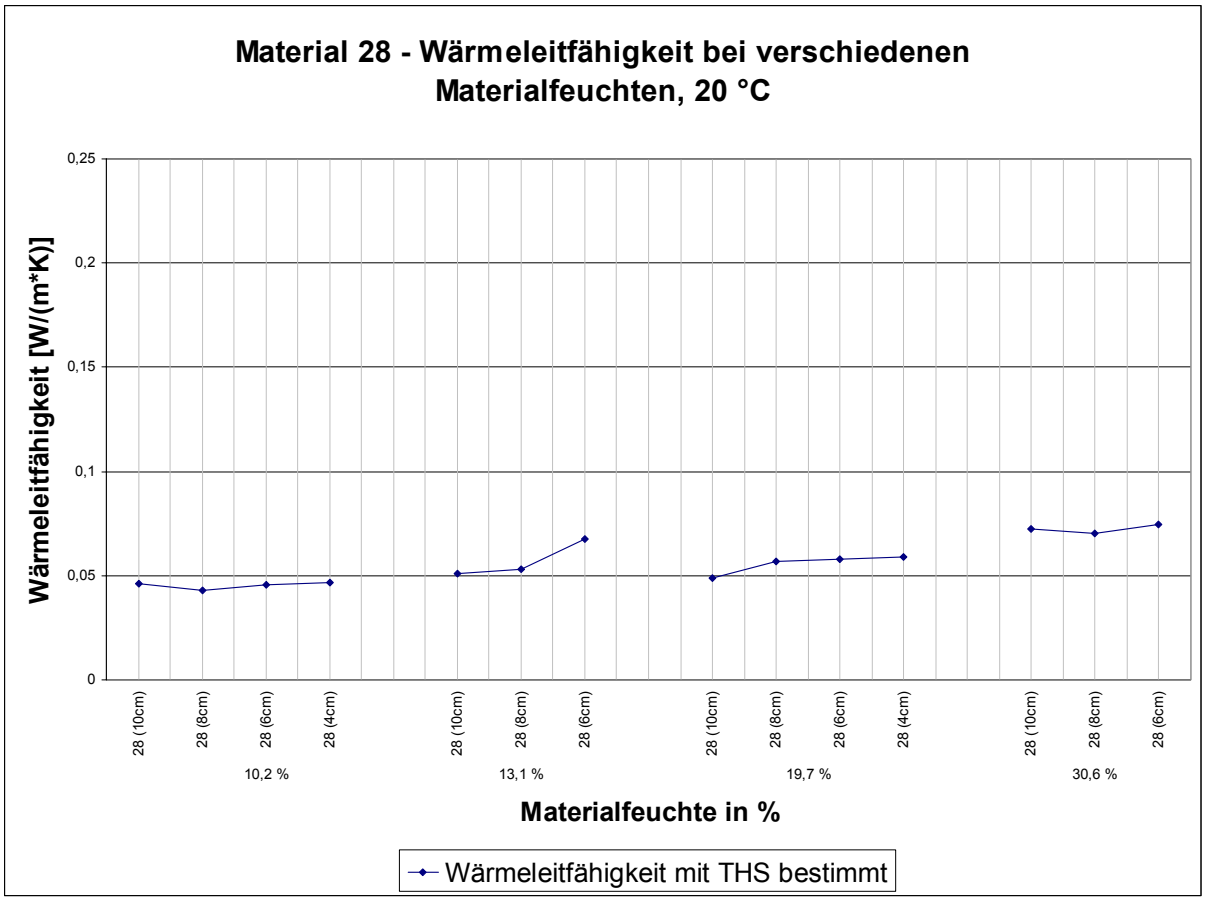
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0508 (10 cm) 0,0533 (8 cm) 0,0676 (6 cm)	13,1	47,49 59,36 79,15

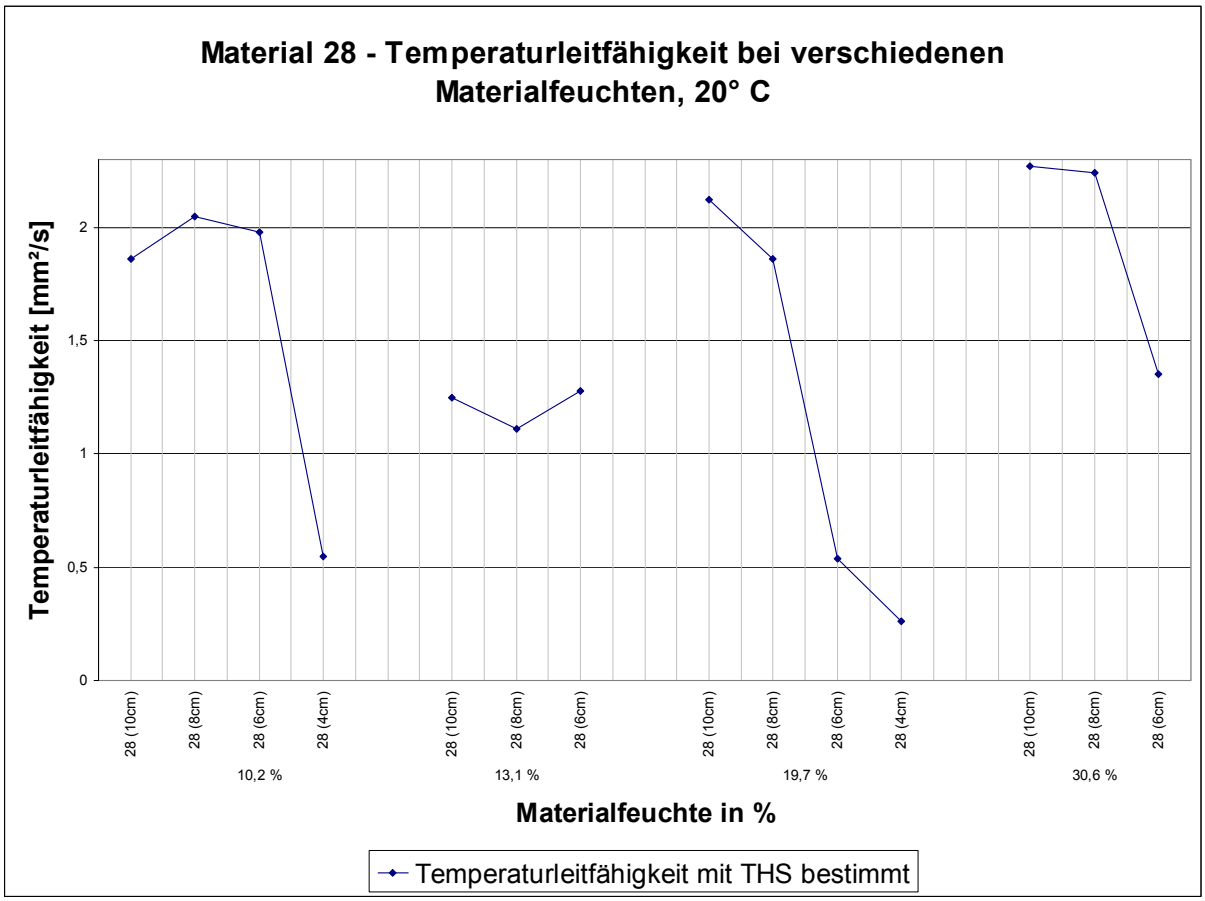
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0486 (10 cm) 0,0567 (8 cm) 0,0581 (6 cm) 0,0591 (4 cm)	19,7	51,77 64,71 86,28 129,42

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0725 (10 cm) 0,0705 (8 cm) 0,0745 (6 cm)	30,6	52,94 66,18 88,23




Material 28 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
0
0,5
1
1,5
2
28 (10cm)
28 (8cm)
28 (6cm)
28 (4cm)
10,2 %
13,1 %
19,7 %
30,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 29:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Eingeblasene Hanffasern		H	40 - 60	0,048

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0552 (10 cm) 0,054 (8 cm) 0,0595 (6 cm)	8,8	52,71 65,89 87,85

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

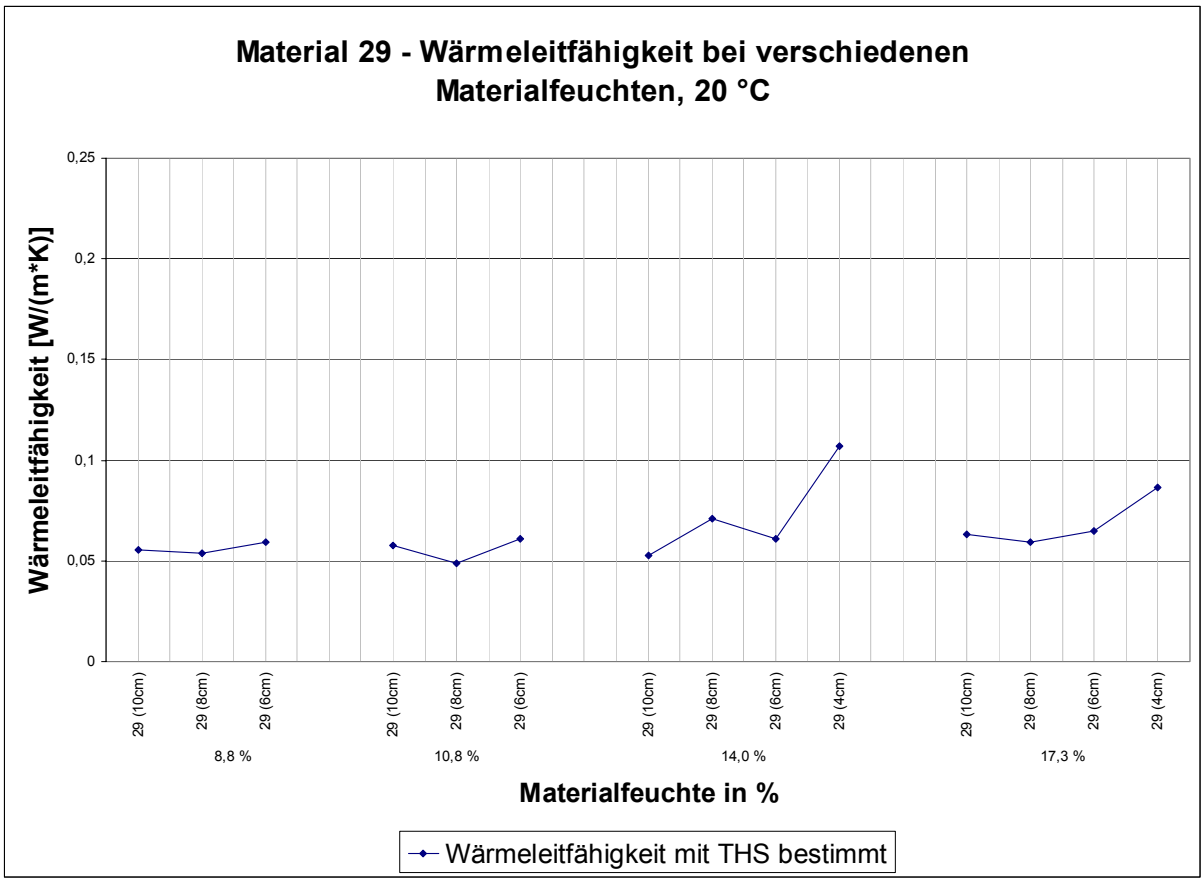
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0578 (10 cm) 0,0487 (8 cm) 0,0611 (6 cm)	10,8	52,41 65,51 87,35

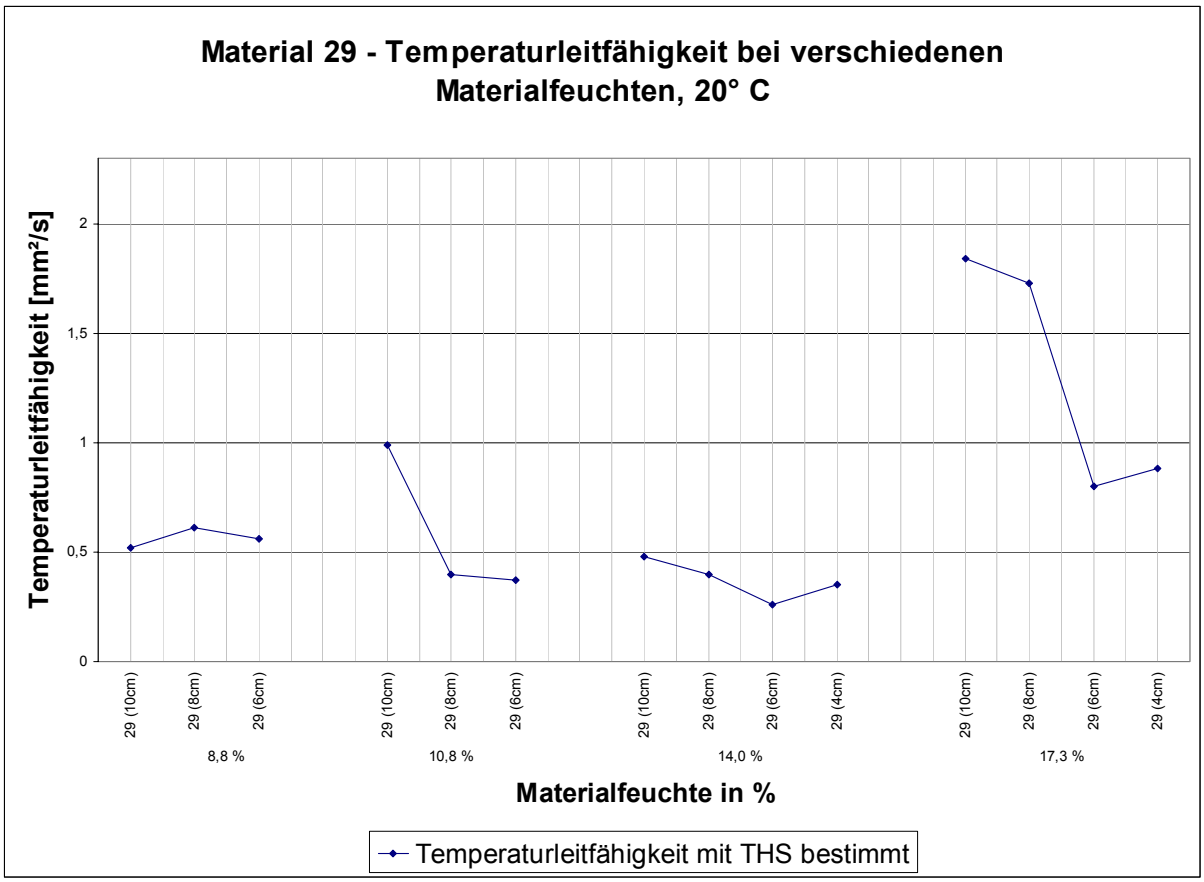
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0529 (10 cm) 0,0712 (8 cm) 0,0611 (6 cm) 0,107 (4 cm)	14,0	56,12 70,15 93,53 140,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0632 (10 cm) 0,0595 (8 cm) 0,0648 (6 cm) 0,0867 (4 cm)	17,3	57,29 71,62 95,49 143,23




Material 29 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
29 (10cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (10cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (10cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (4cm)
29 (10cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (4cm)
8,8 %
10,8 %
14,0 %
17,3 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 30:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Ausgleichs-schüttung		AB	140	0,055

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0665	7,3	140

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

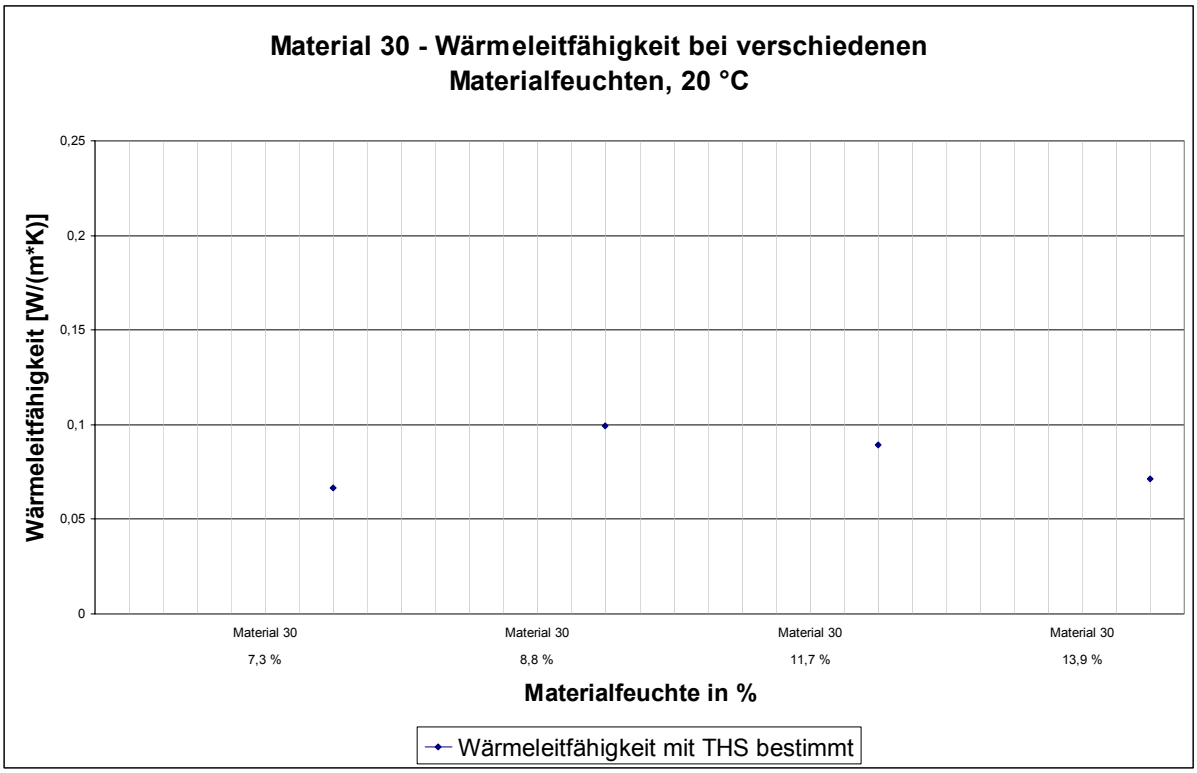
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0994	8,8	142,1

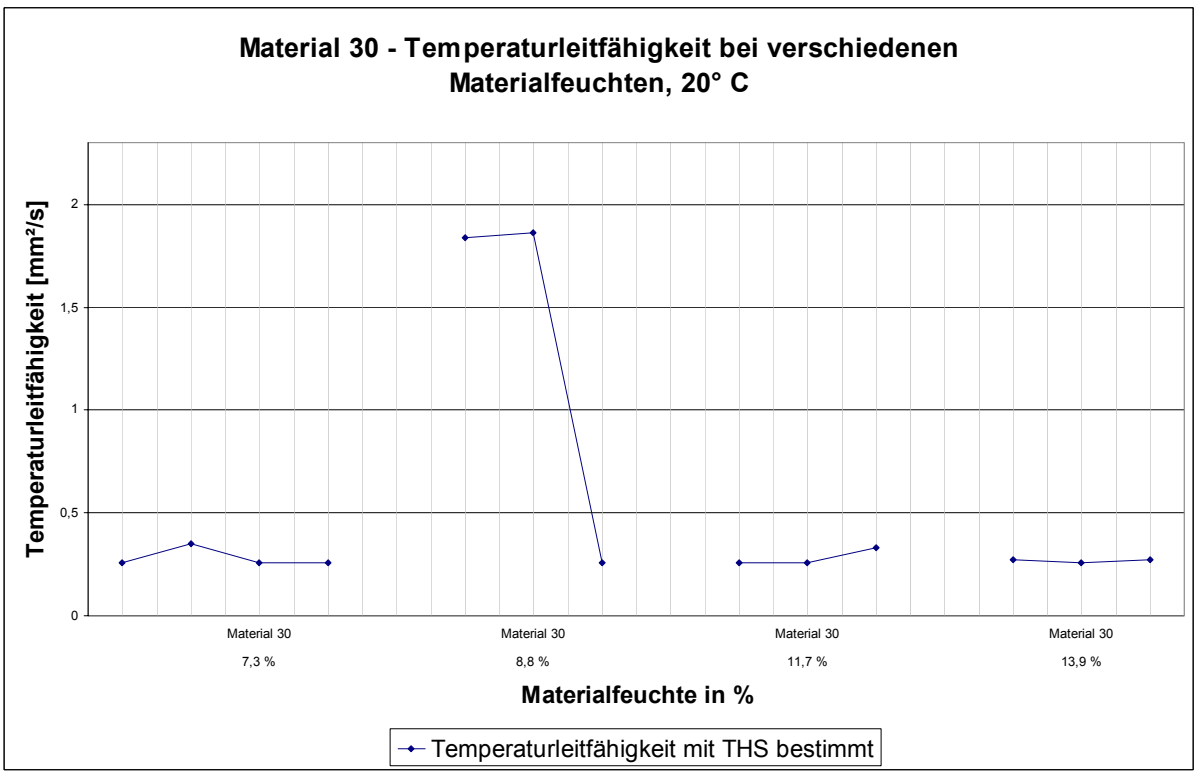
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0894	11,7	146,2

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0714	13,9	149,2


Material 30 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 30
7,3 %
Material 30
8,8 %
Material 30
11,7 %
Material 30
13,9 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 30 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 30
7,3 %
Material 30
8,8 %
Material 30
11,7 %
Material 30
13,9 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 31:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Ausgleichs-schüttung		U	450	0,16

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0902	0,1	450

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

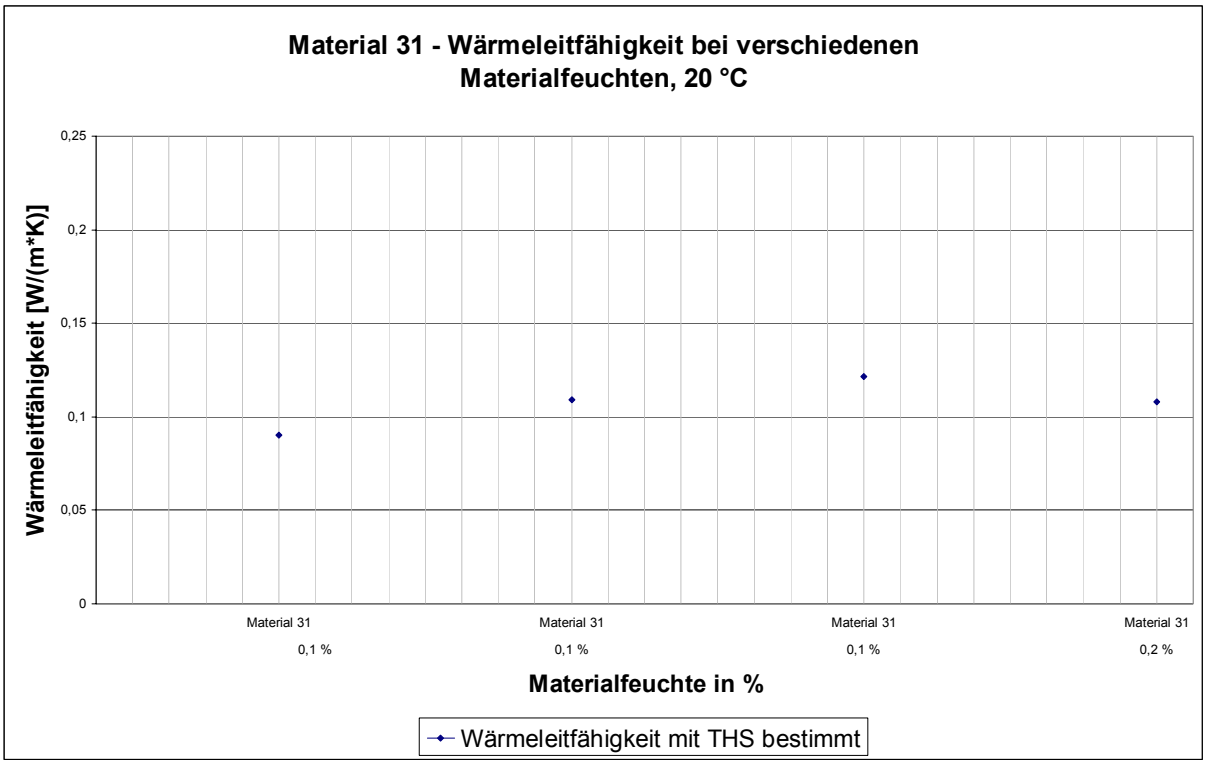
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,109	0,1	450

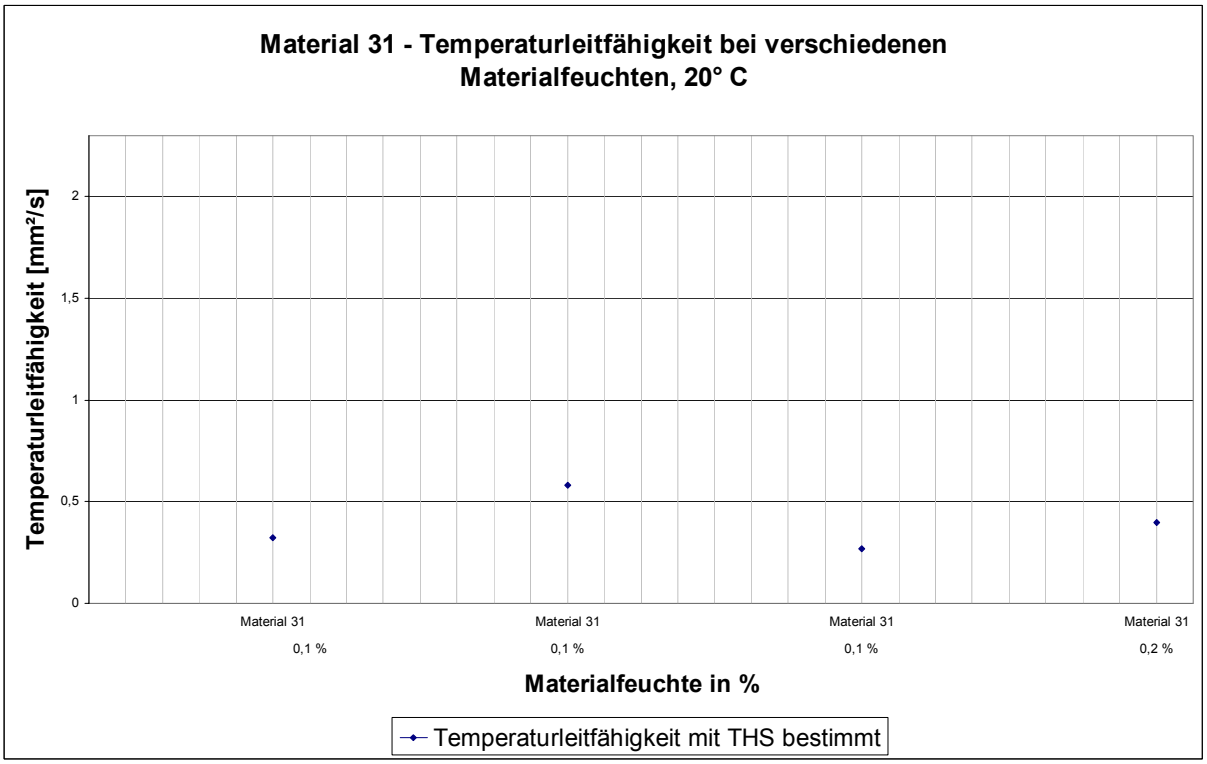
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,121	0,1	450

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,108	0,2	450


Material 31 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 31 0,1 %
Material 31 0,1 %
Material 31 0,1 %
Material 31 0,2 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 31 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 31 0,1 %
Material 31 0,1 %
Material 31 0,1 %
Material 31 0,2 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 32:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Ausgleichs-schüttung		R	90	0,05

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0475	0,4	90

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

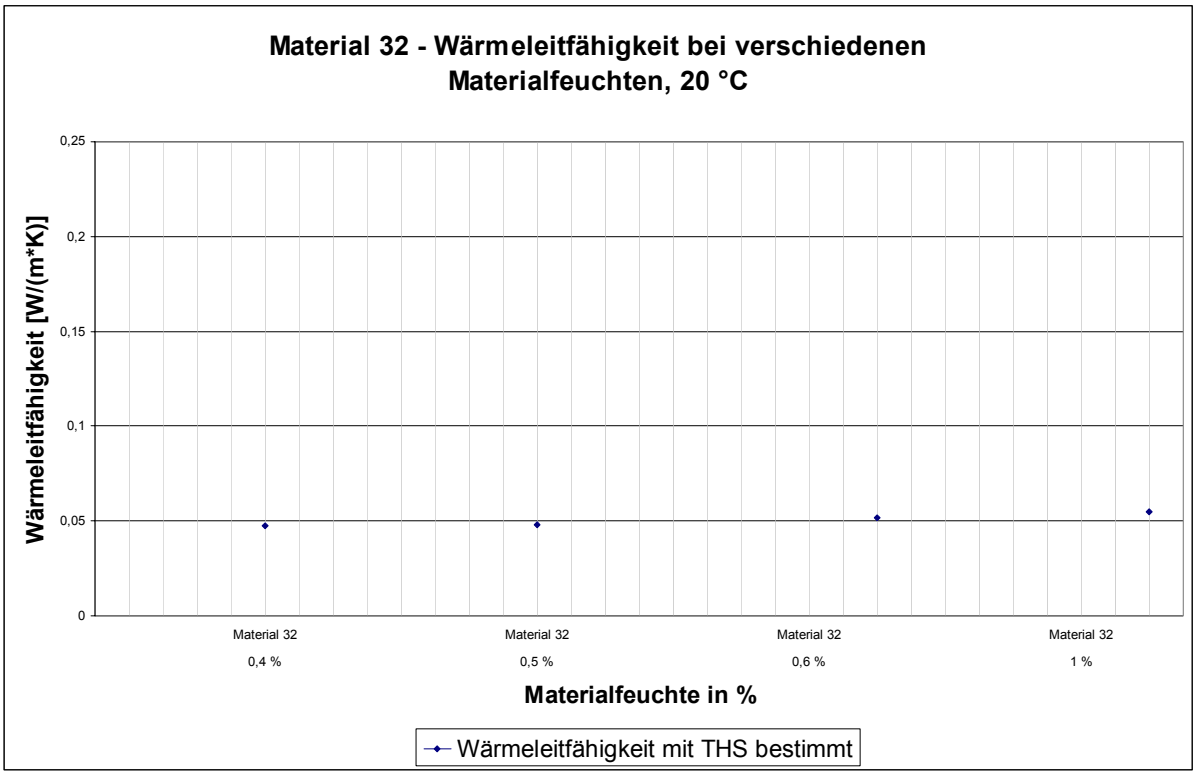
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0482	0,5	90,1

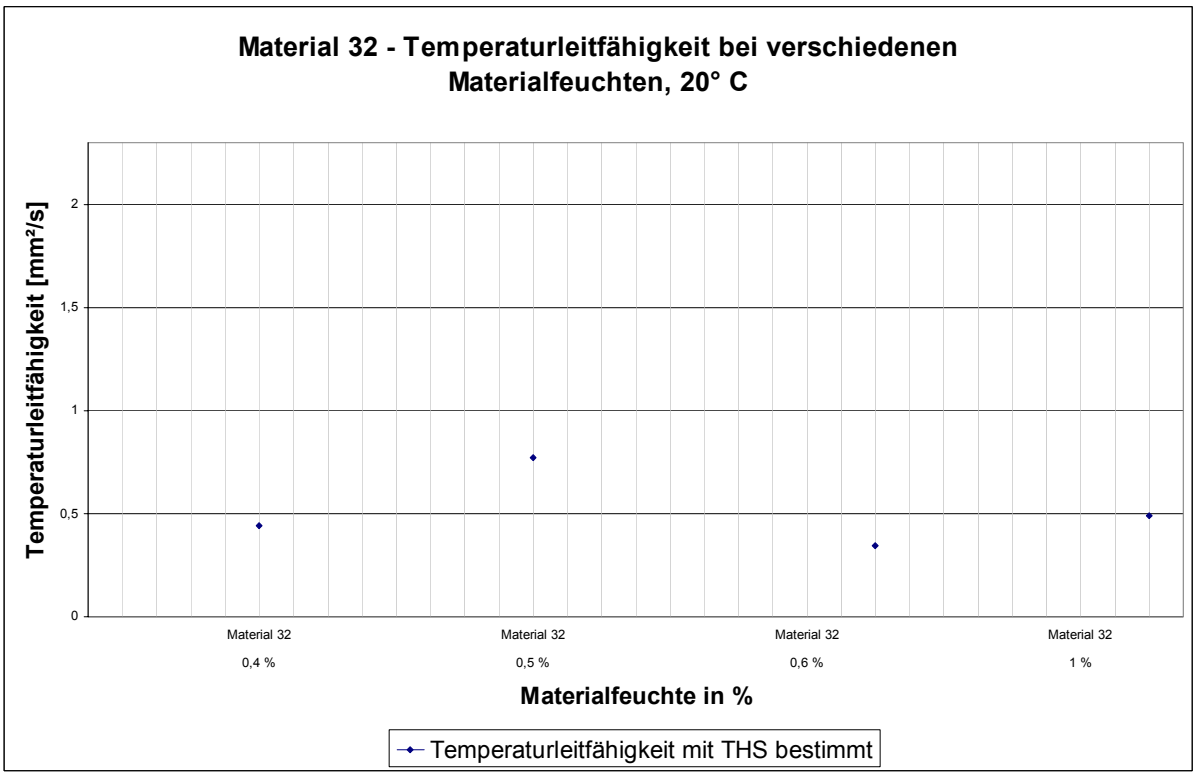
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0519	0,6	90,2

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0546	1,0	90,5


Material 32 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 32 0,4 %
Material 32 0,5 %
Material 32 0,6 %
Material 32 1 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 32 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 32 0,4 %
Material 32 0,5 %
Material 32 0,6 %
Material 32 1 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 33:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Backkork		V	100	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0373	2,3	100

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

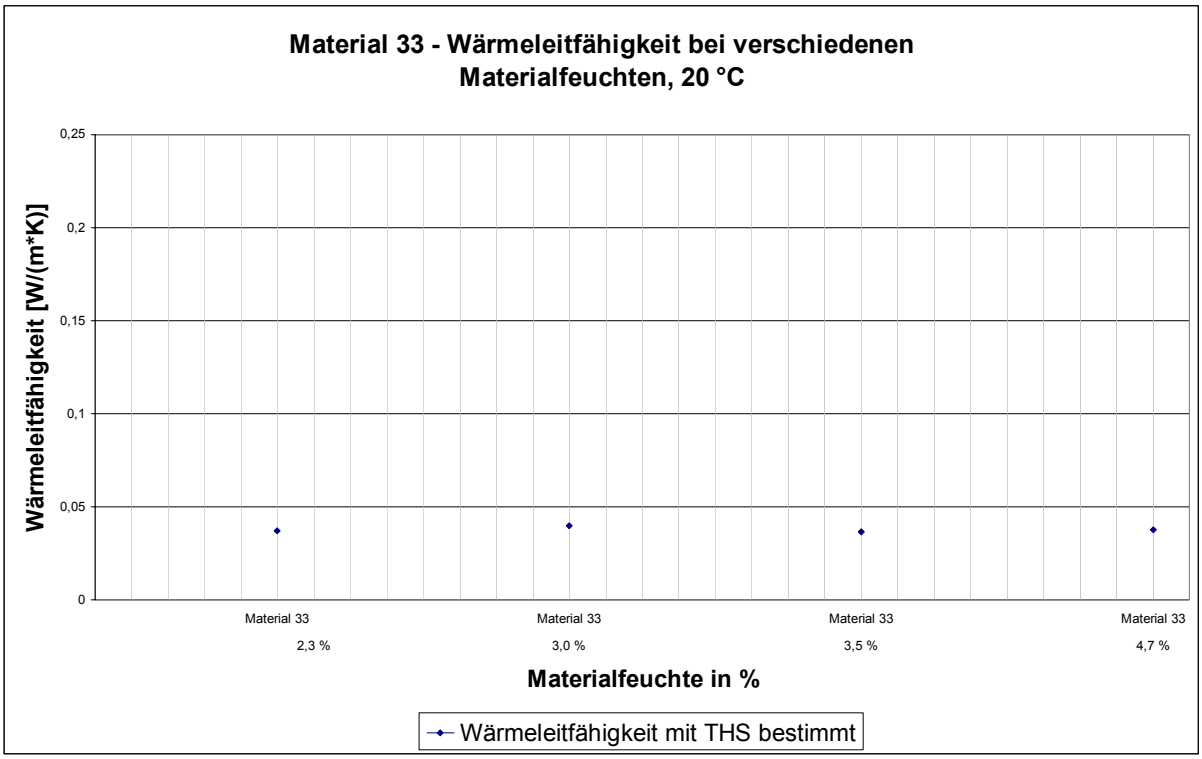
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0396	3,0	100,7

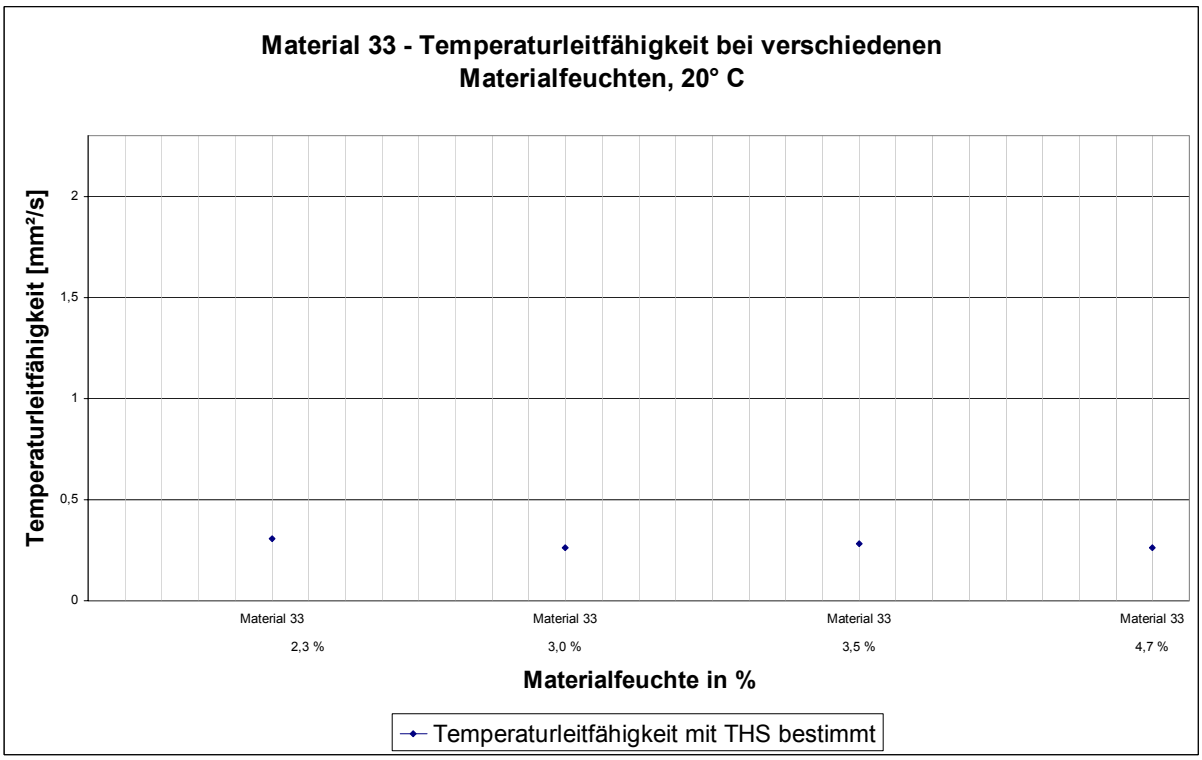
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0367	3,5	101,2

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0374	4,7	102,4


Material 33 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 33 2,3 %
Material 33 3,0 %
Material 33 3,5 %
Material 33 4,7 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 33 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 33 2,3 %
Material 33 3,0 %
Material 33 3,5 %
Material 33 4,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 34:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Backkork		V	100	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0365	2,1	100

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

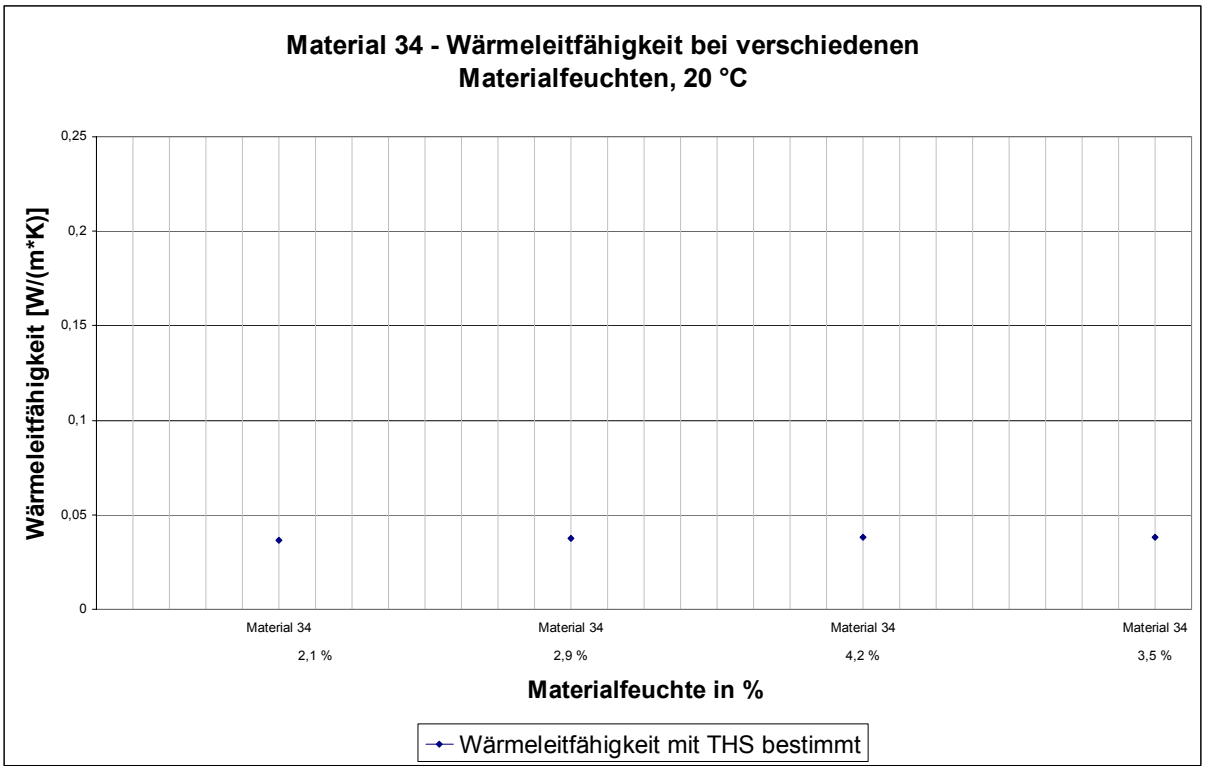
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0374	2,9	100,8

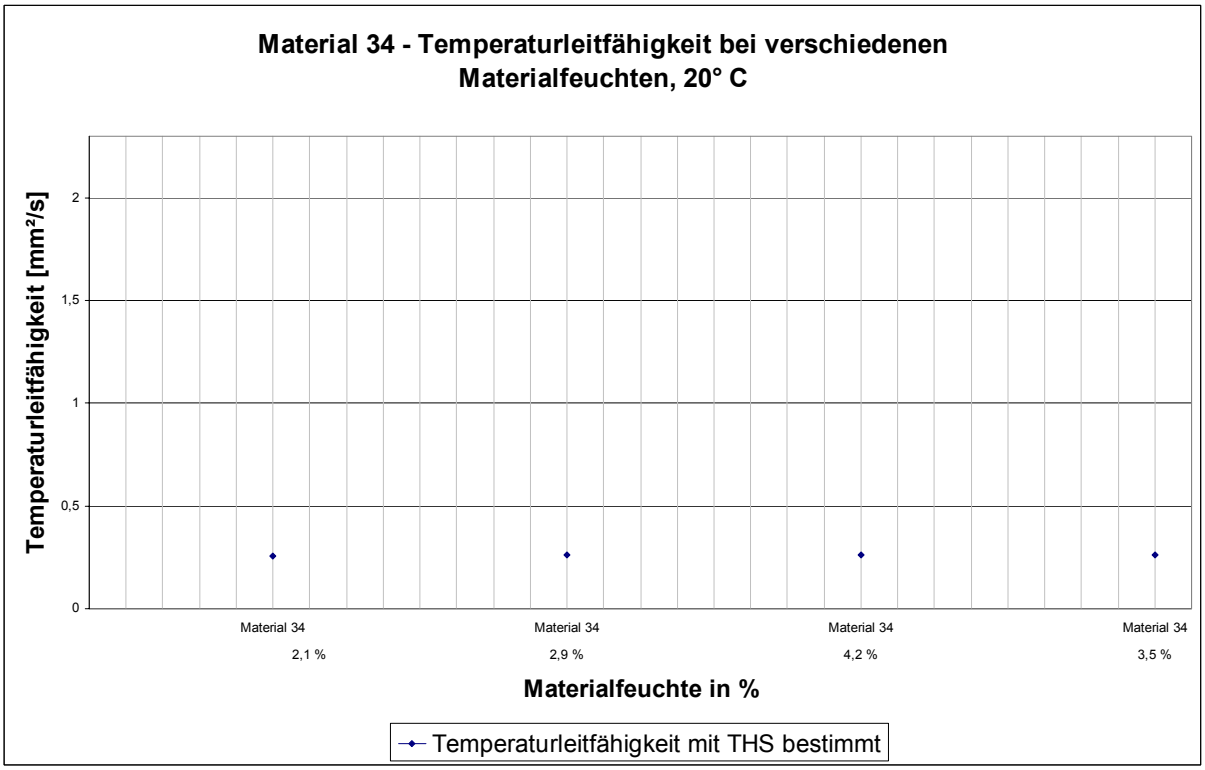
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0379	4,2	102,1

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0381	3,5	101,4


Material 34 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 34 2,1 %
Material 34 2,9 %
Material 34 4,2 %
Material 34 3,5 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 34 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 34 2,1 %
Material 34 2,9 %
Material 34 4,2 %
Material 34 3,5 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 35:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Thermohanf		AC	24 - 42	0,04

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0486	7,1	30

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

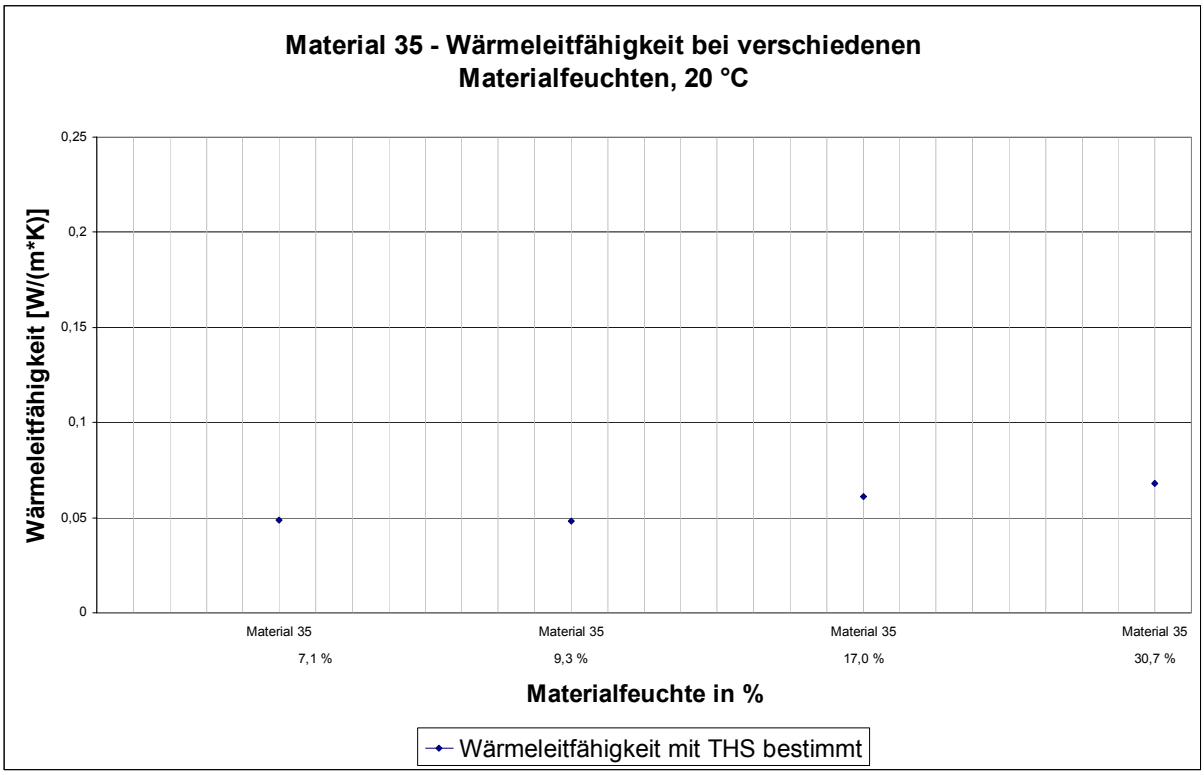
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0483	9,3	30,7

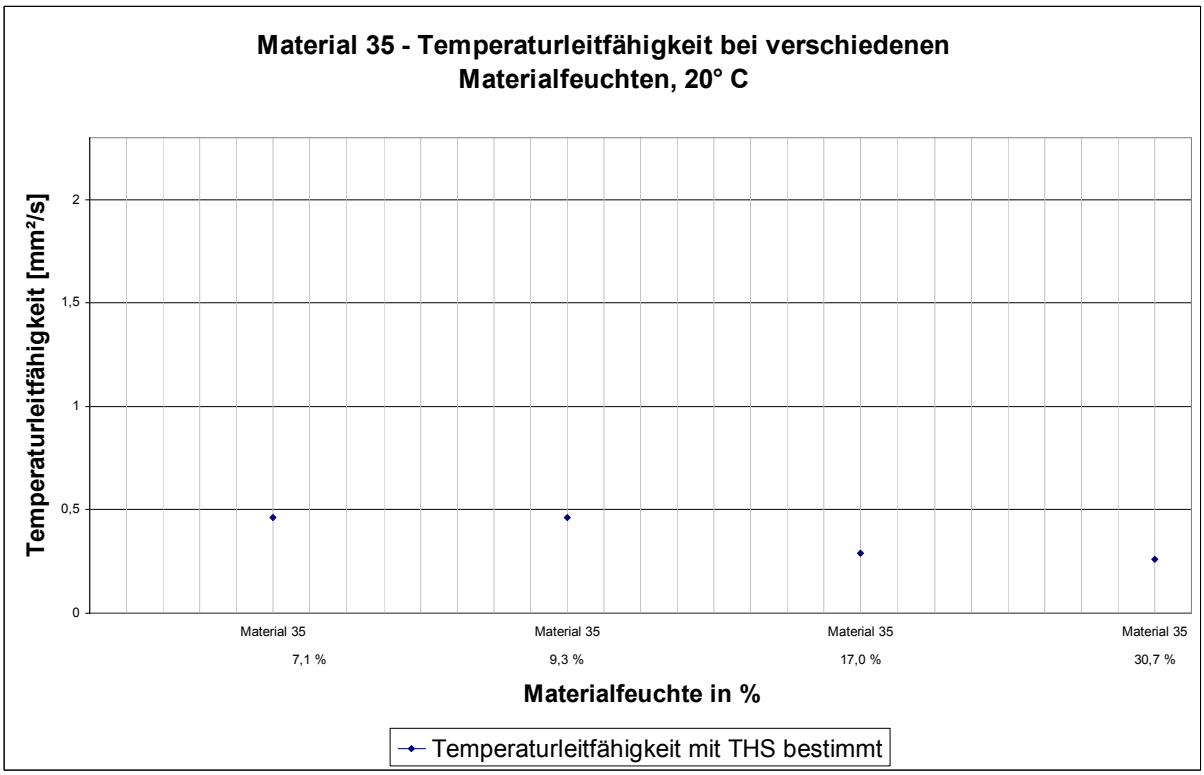
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0612	17,0	33,0

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0678	30,7	37,1


Material 35 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 35 7,1 %
Material 35 9,3 %
Material 35 17,0 %
Material 35 30,7 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 35 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 35 7,1 %
Material 35 9,3 %
Material 35 17,0 %
Material 35 30,7 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 36:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Kokosmatte		AB	100	0,045

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0549	7,9	100

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

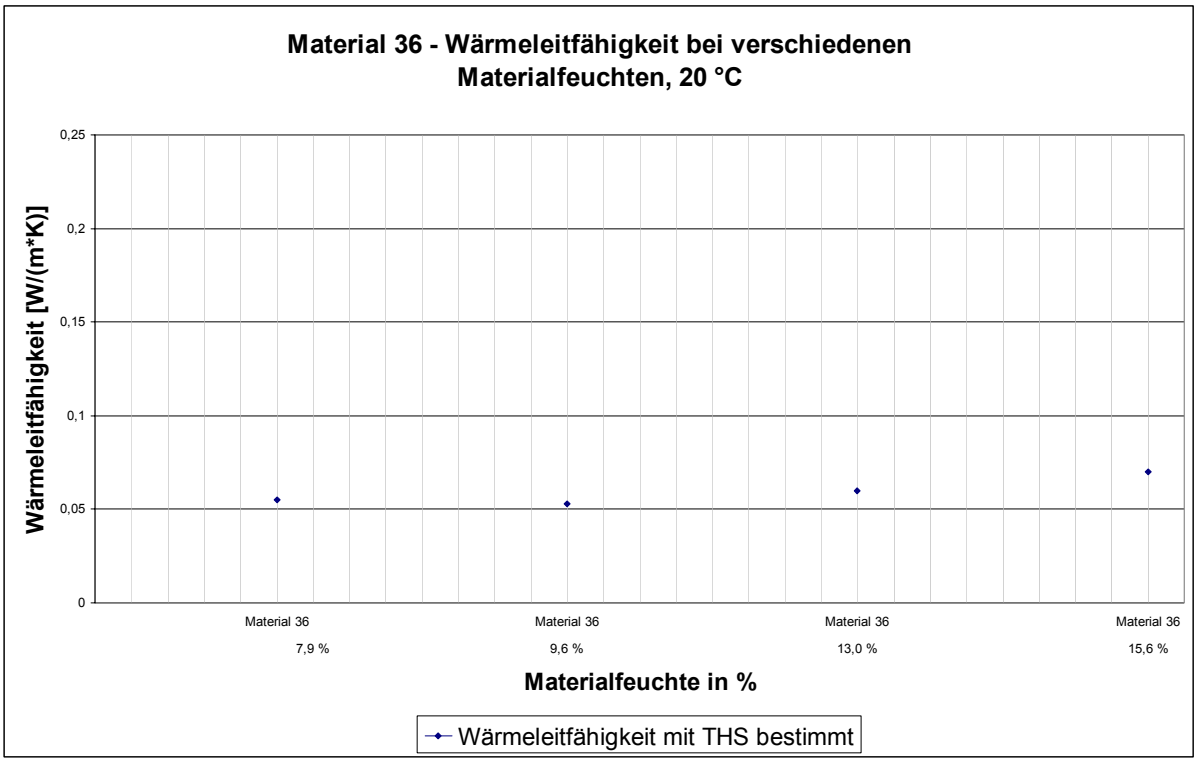
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0527	9,6	101,7

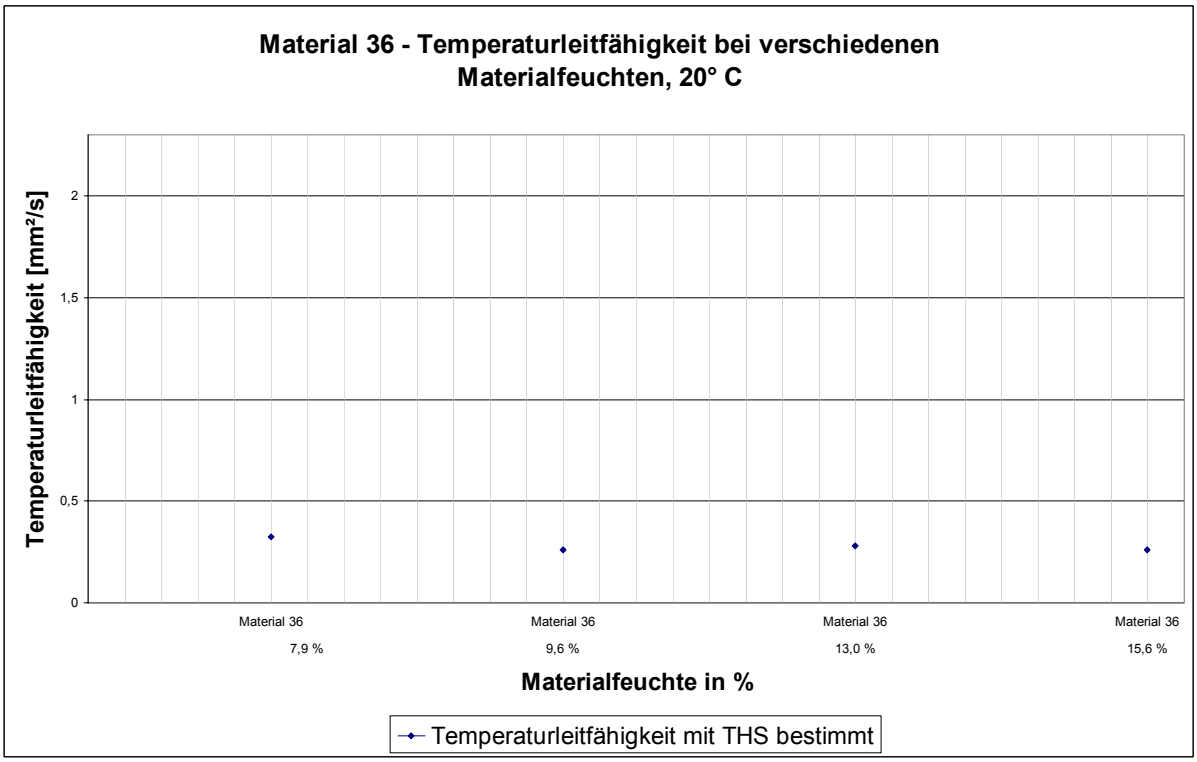
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0599	13,0	105,1

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0702	15,6	107,7


Material 36 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 36 7,9 %
Material 36 9,6 %
Material 36 13,0 %
Material 36 15,6 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 36 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 36 7,9 %
Material 36 9,6 %
Material 36 13,0 %
Material 36 15,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 37:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Kokosmatte		AB	100	0,045

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,051	7,9	100

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

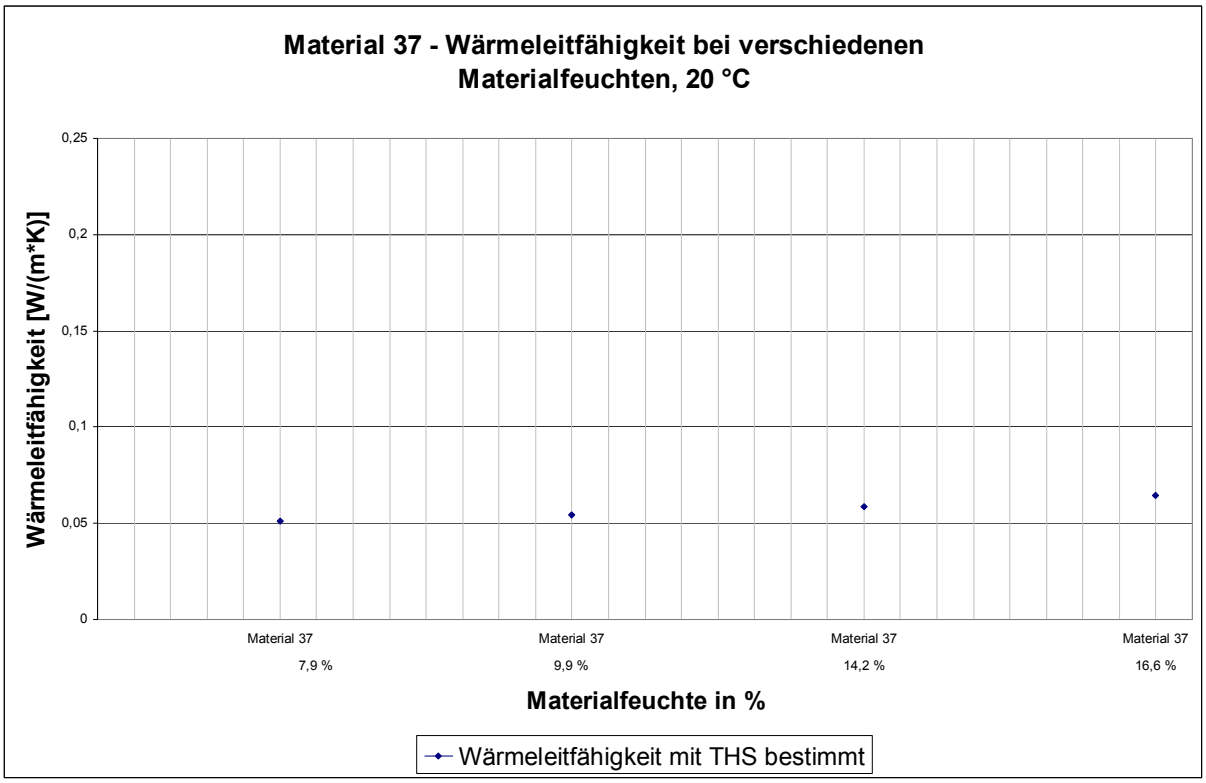
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0542	9,9	102

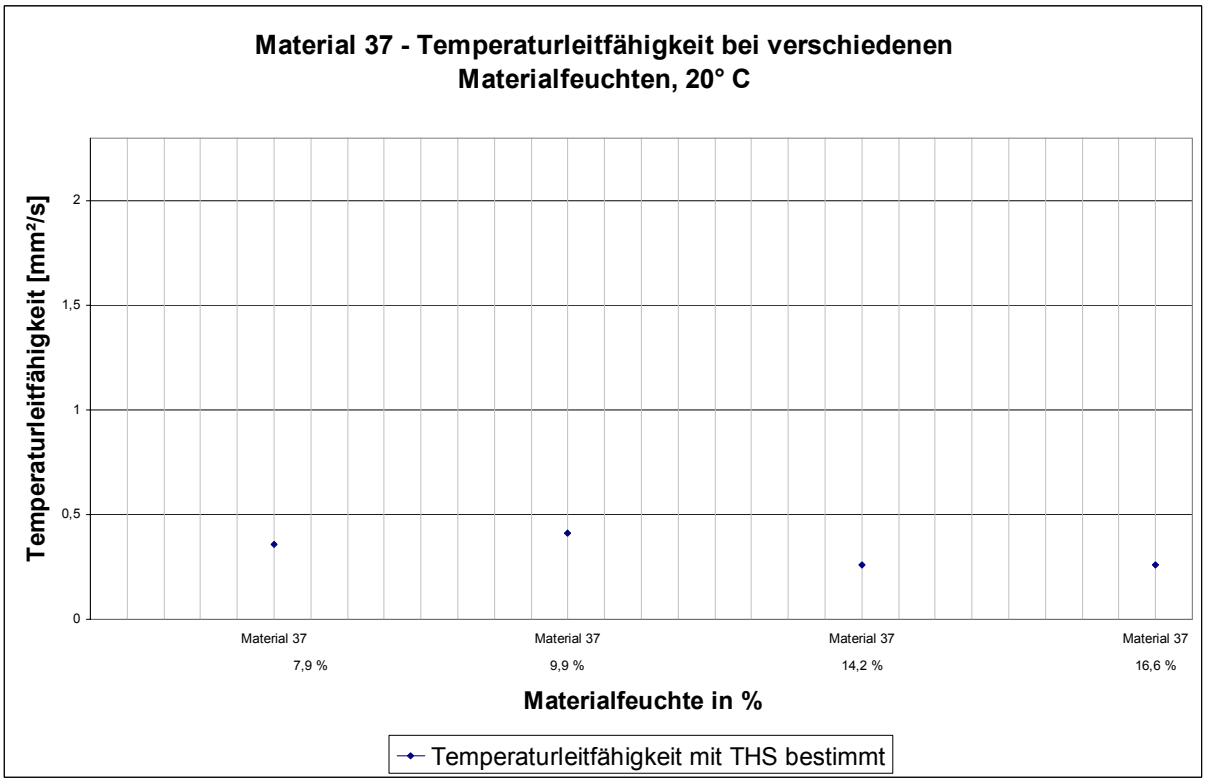
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,059	14,2	106,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0646	16,6	108,7


Material 37 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 37 7,9 %
Material 37 9,9 %
Material 37 14,2 %
Material 37 16,6 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 37 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 37 7,9 %
Material 37 9,9 %
Material 37 14,2 %
Material 37 16,6 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 38:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Holzfaserplatte		M	55	0,038

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0468	7,5	55

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

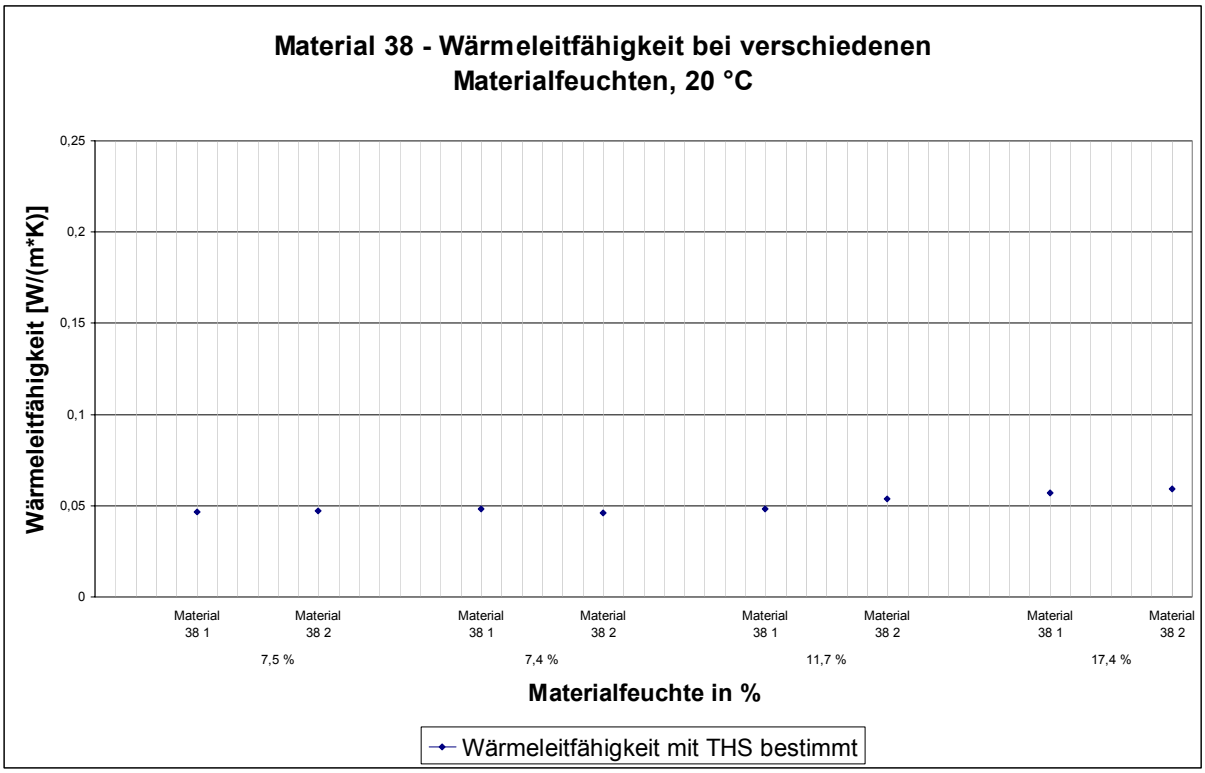
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0472	7,4	55

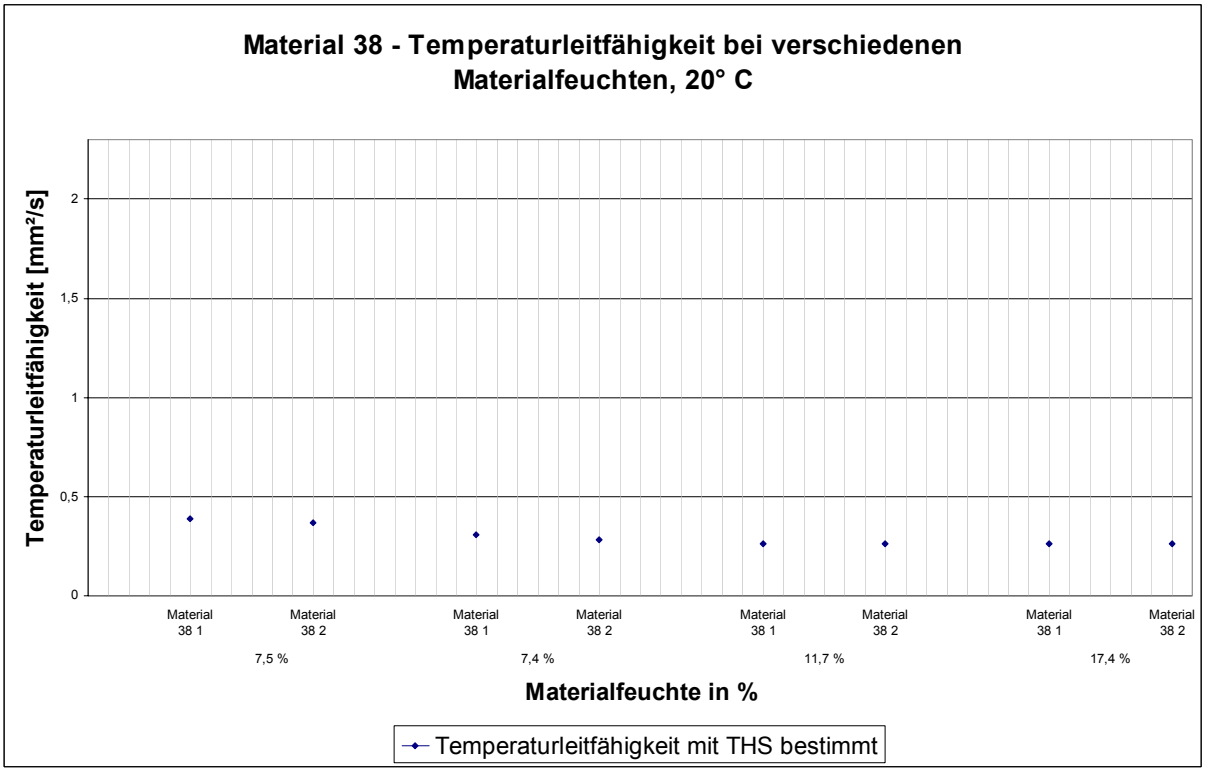
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0509	11,7	57,3

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0583	17,4	60,4


Material 38 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 38 1
Material 38 2
7,5 %
7,4 %
11,7 %
17,4 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 38 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 38 1
Material 38 2
7,5 %
7,4 %
11,7 %
17,4 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 39:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Wolle		E	16	0,0442

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0380 (10 cm) 0,0388 (8 cm) 0,0397 (6 cm) 0,0396 (4 cm)	9,6	17,2 21,5 28,7 43,0

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

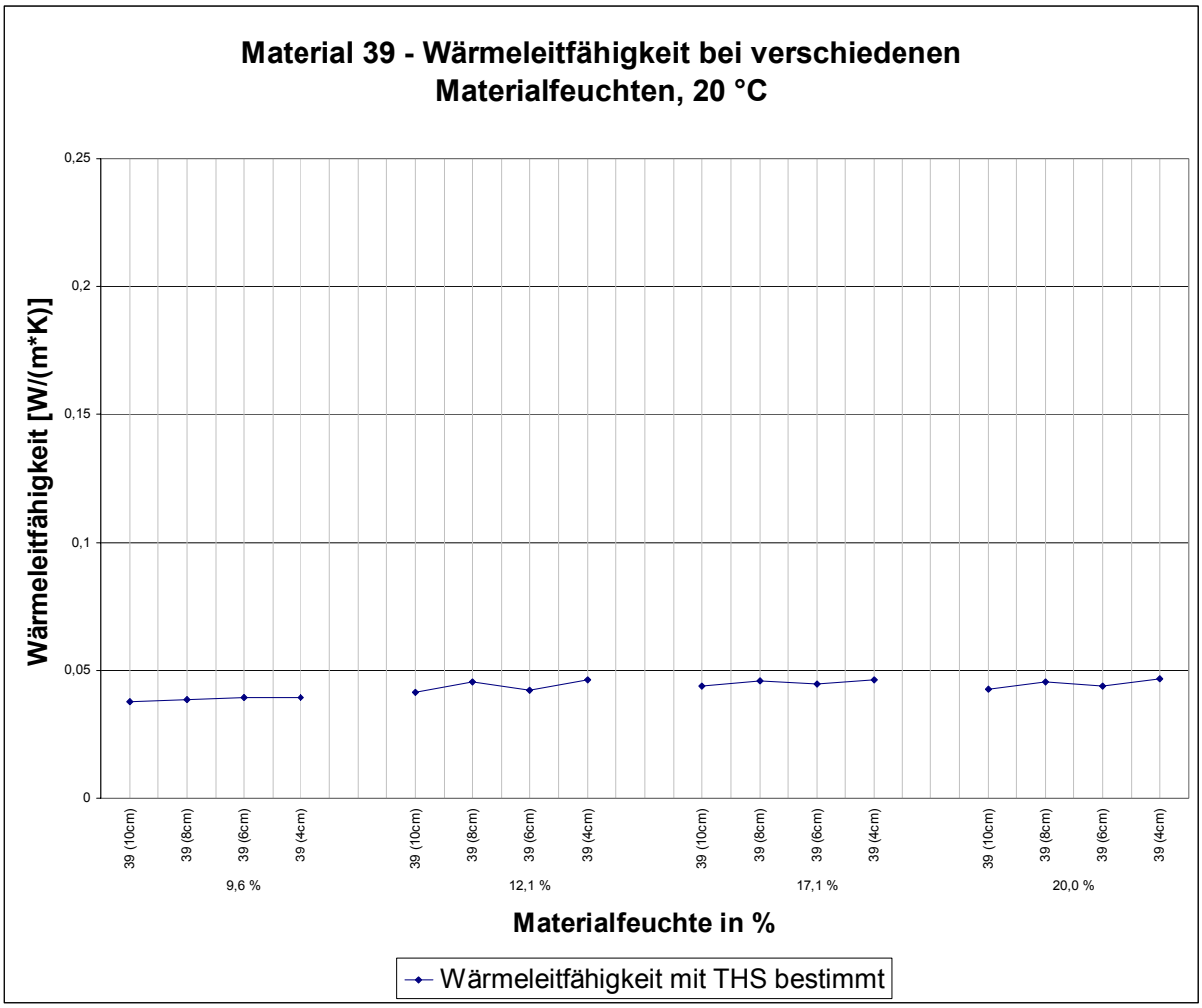
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0416 (10 cm) 0,0456 (8 cm) 0,0423 (6 cm) 0,0464 (4 cm)	12,1	17,4 21,7 29,0 43,4

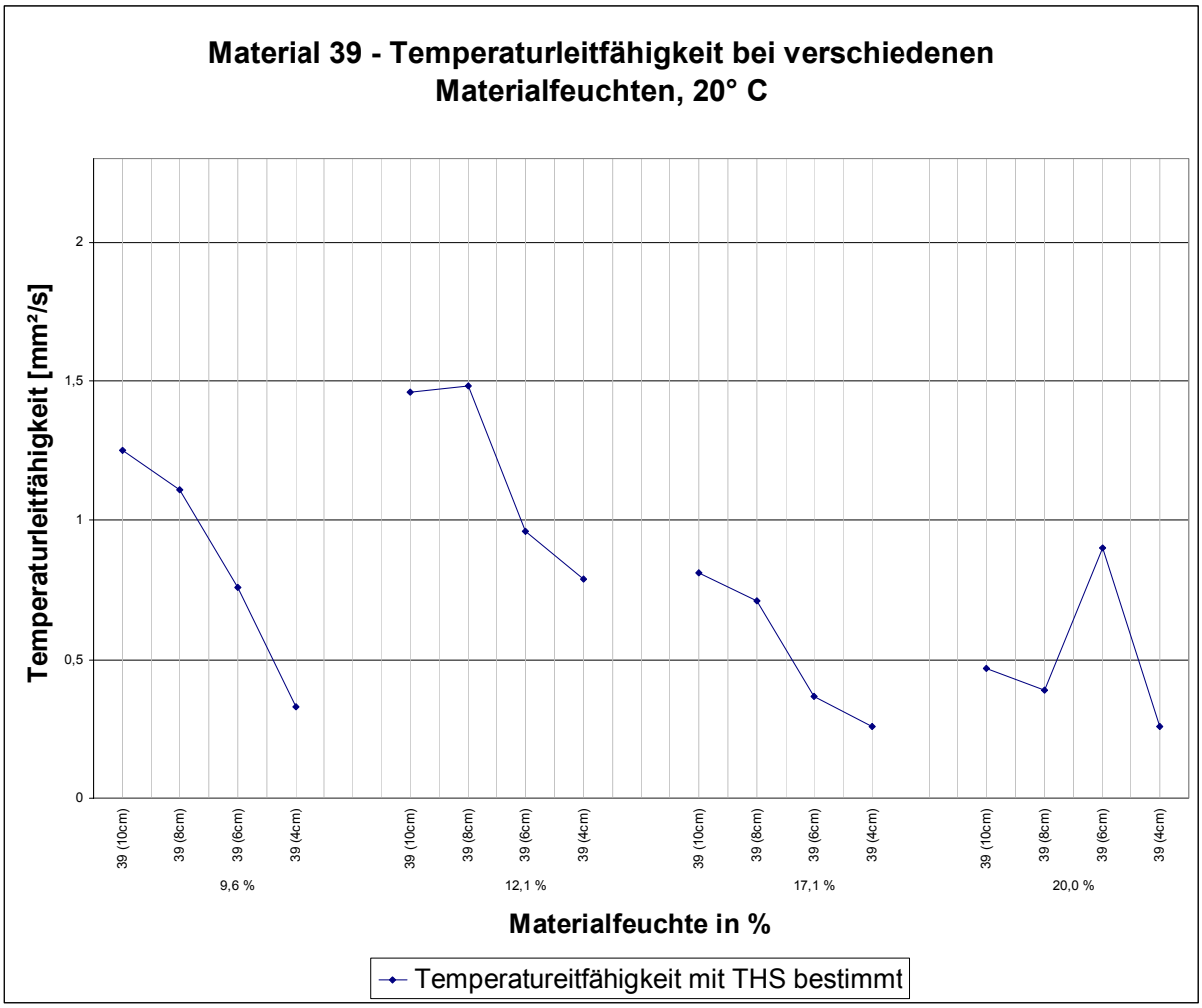
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0439 (10 cm) 0,0462 (8 cm) 0,0448 (6 cm) 0,0464 (4 cm)	17,1	21,8 27,3 36,4 54,6

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,043 (10 cm) 0,0456 (8 cm) 0,0429 (6 cm) 0,0471 (4 cm)	20,0	23,38 29,23 38,97 58,45




Material 39 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
39 (10cm)
39 (8cm)
39 (6cm)
39 (4cm)
9,6 %
12,1 %
17,1 %
20,0 %
Materialfeuchte in %
Temperatureitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 40:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Korkschüttung		AB	70	0,05

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,046	2,3	70

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

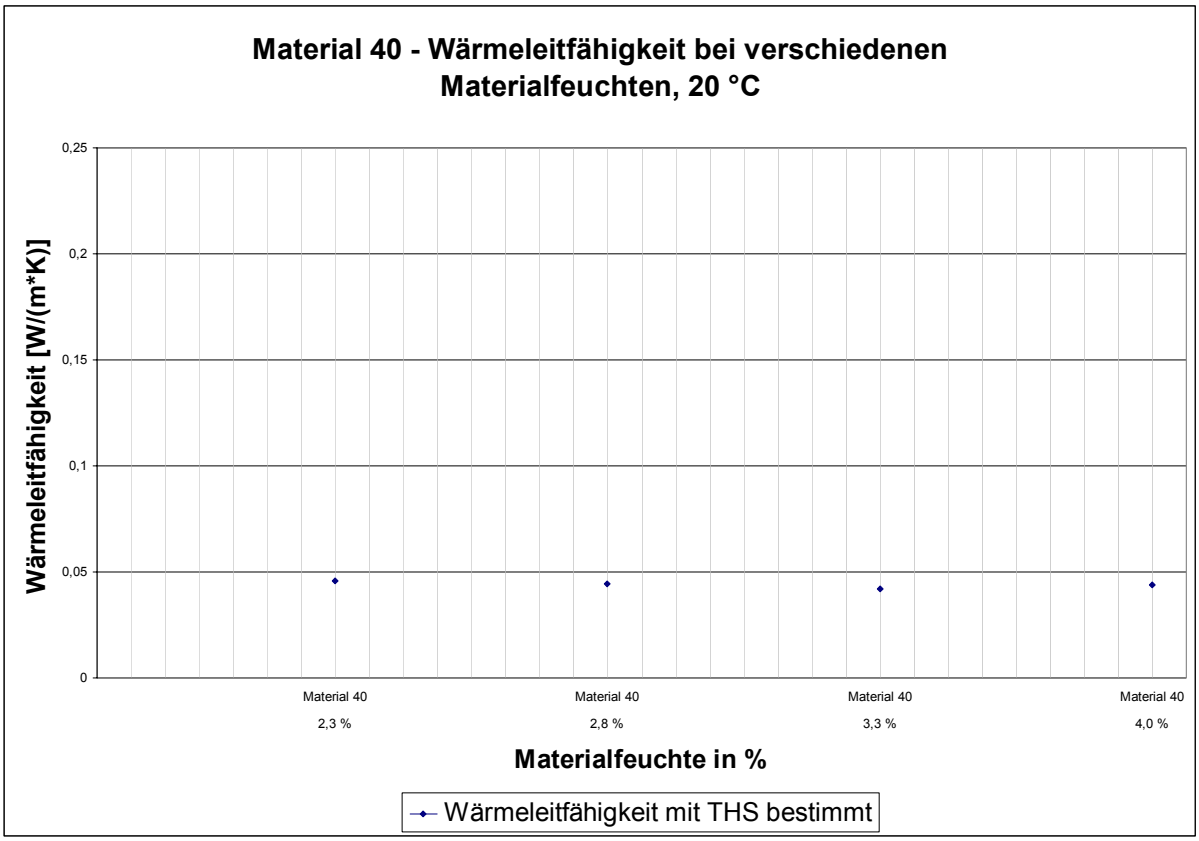
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,044	2,8	70,4

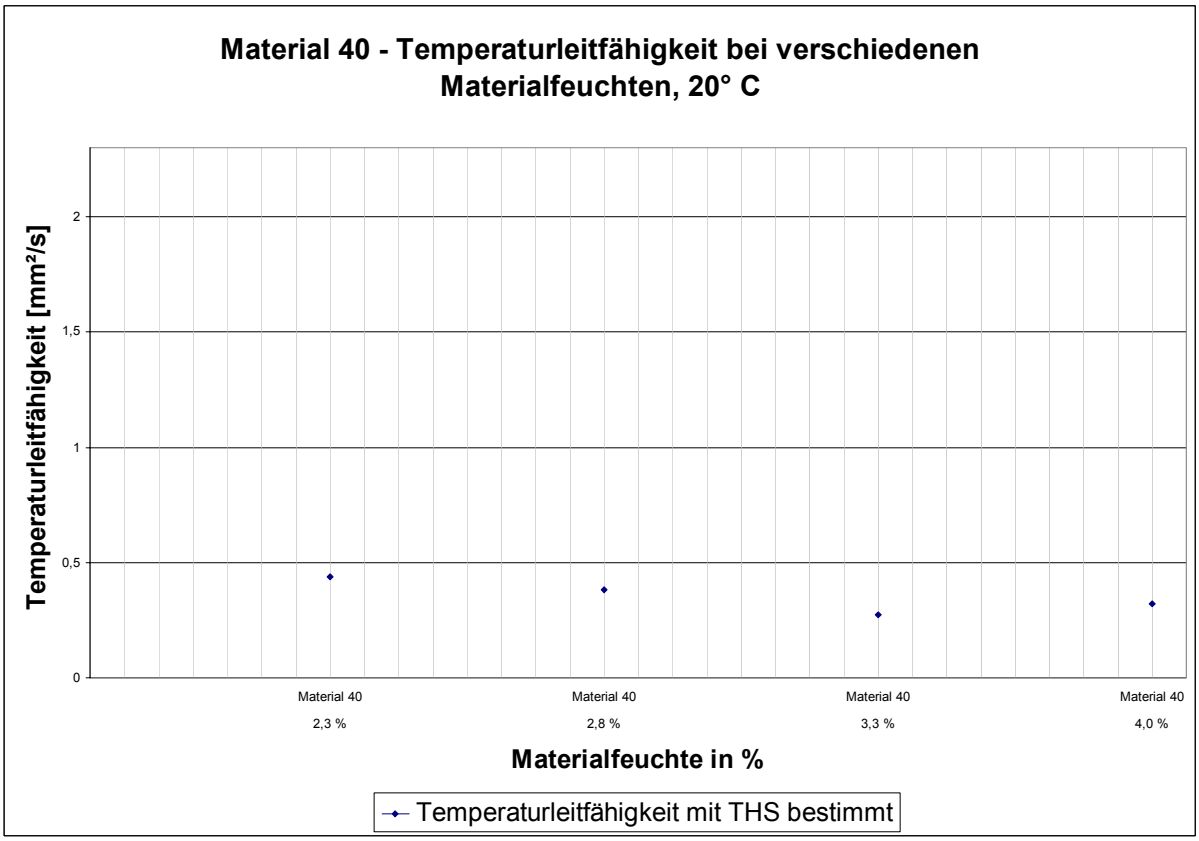
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,042	3,3	70,8

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 85% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0437	4,0	71,2


Material 40 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
Material 40
2,3 %
Material 40
2,8 %
Material 40
3,3 %
Material 40
4,0 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt


Material 40 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
Material 40
2,3 %
Material 40
2,8 %
Material 40
3,3 %
Material 40
4,0 %
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 41:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Nadelholz-Späne		B	50 - 90	0,045

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0475 (10 cm) 0,0488 (8 cm) 0,0499 (6 cm) 0,0509 (4 cm)	7,4	42,24 52,8 70,4 105,6

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0499 (10 cm) 0,0503 (8 cm) 0,0499 (6 cm)	-	42,47 53,09 70,79

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0588 (10 cm) 0,0657 (8 cm) 0,0564 (6 cm) 0,0597 (4 cm)	14,4	39,5 49,38 65,84 98,76

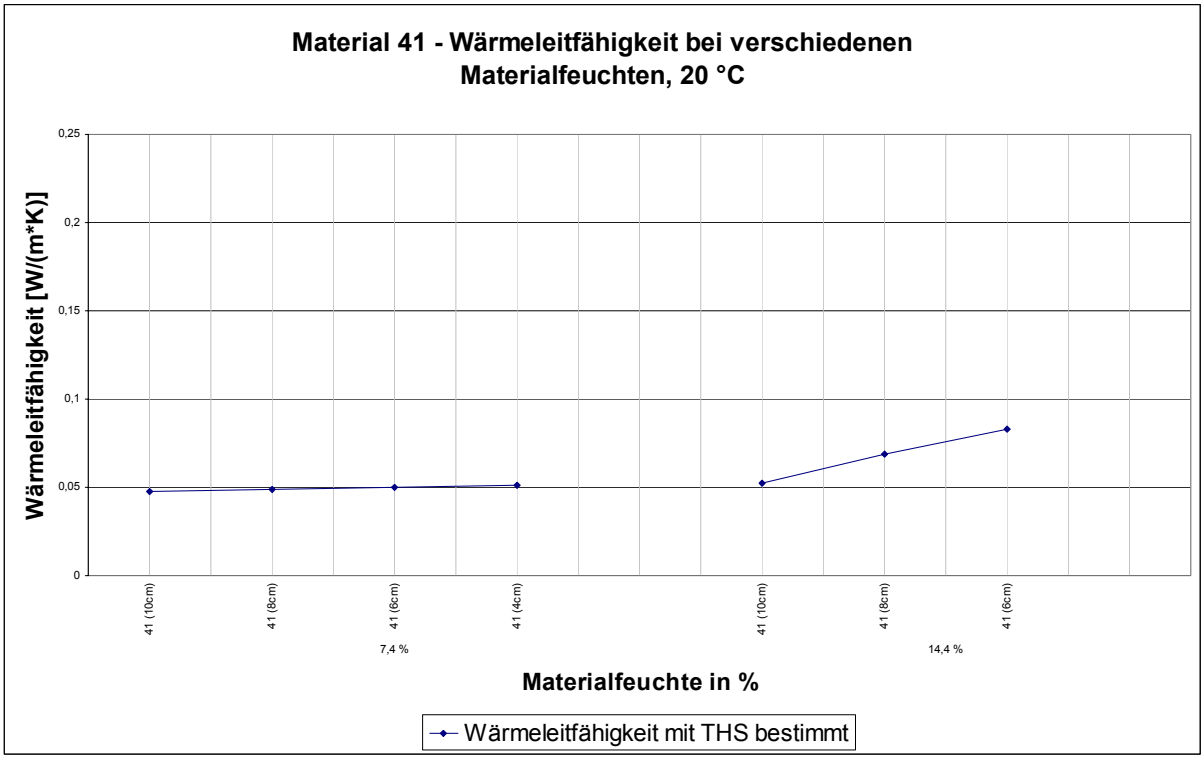
Ergebnisse der Messungen mit dem Zweiplattenverfahren

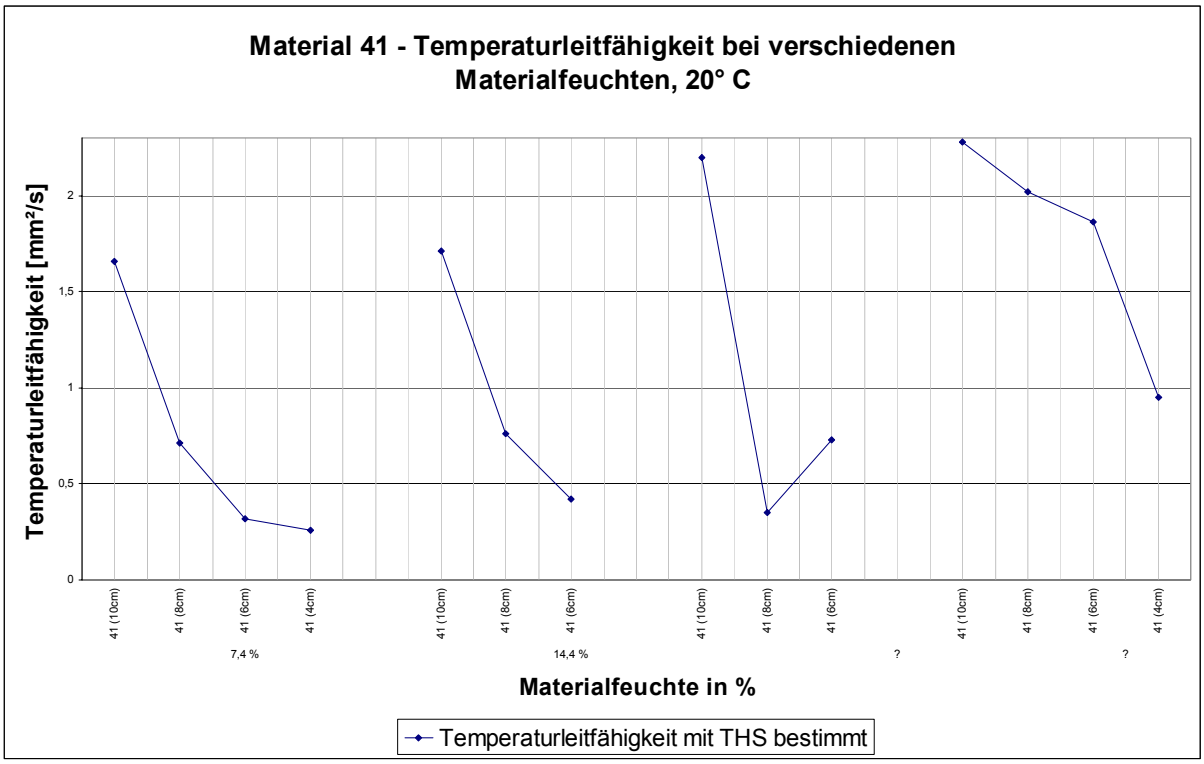
Material Nr. 41 Nadelholz-Späne

Dichte (Kg/m^3): 51,7 Belastung: ca. 30 N (Heizplatte) Dicke: ca. 20 mm

Temperatur [°C]	1. Messung Wärmeleitfähigkeit nach Plattenverfahren [W/(m*K)]	
0	0,0410	
10	0,0413	
23	0,0443	

Telefonisch durchgegebene Werte der PTB (12.4.2007)




Material 41 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
0
0,5
1
1,5
2
41 (10cm)
41 (8cm)
41 (6cm)
41 (4cm)
41 (10cm)
41 (8cm)
41 (6cm)
41 (10cm)
41 (8cm)
41 (6cm)
41 (10cm)
41 (8cm)
41 (6cm)
41 (4cm)
7,4 %
14,4 %
?
?
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Material 42:

Dämmstoffart	Marken-bezeichnung	Hersteller	Rohdichte im eingebauten Zustand [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit lt. Herstellerangaben [W/(m*K)]
Topinambur Mark		WKI	-	-

Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 30% rel. Luftfeuchte:

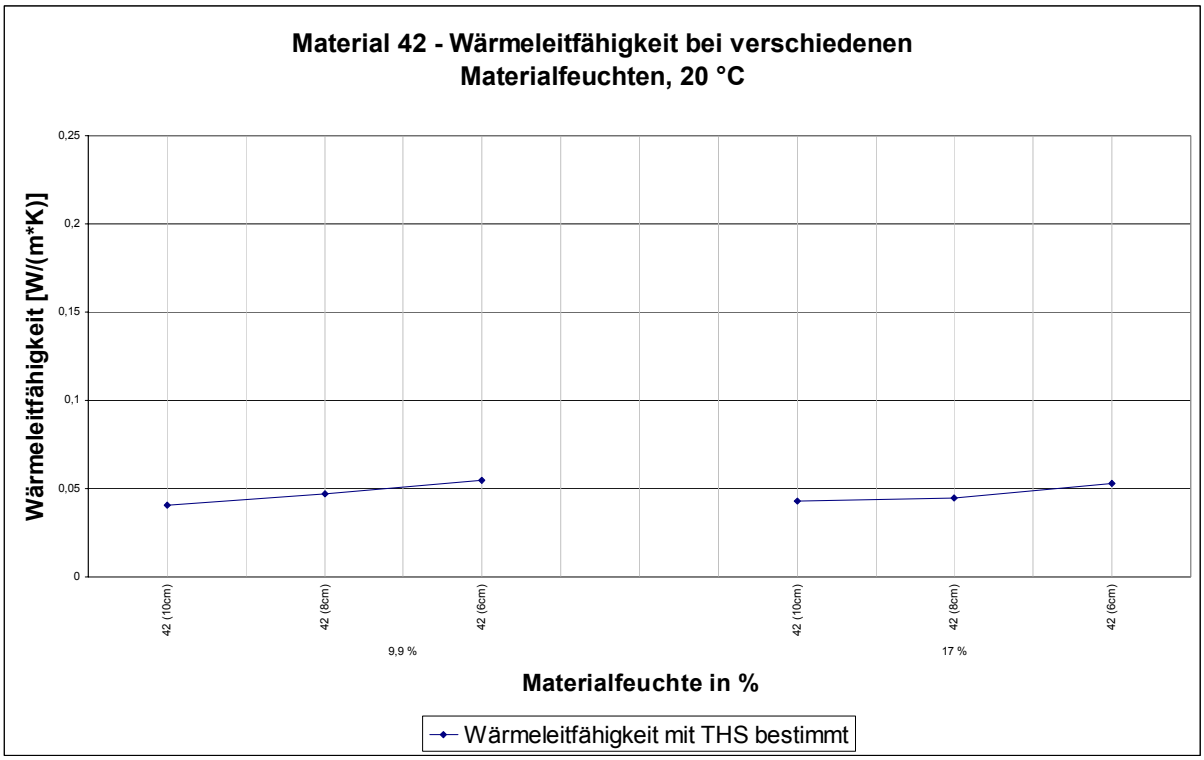
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0405 (10 cm) 0,0469 (8 cm) 0,0547 (6 cm) 0,0396 (4 cm)	9,9	57,78 72,22 96,29 144,44

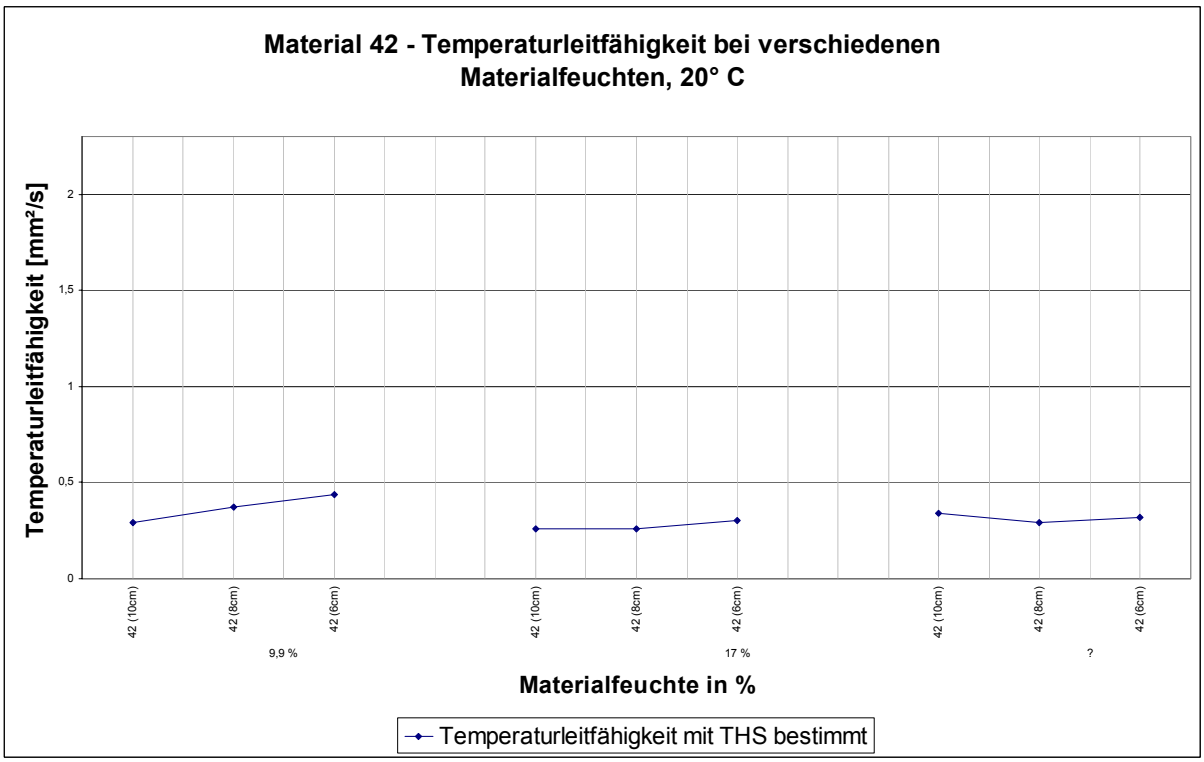
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 50% rel. Luftfeuchte:

Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0435 (10 cm) 0,0459 (8 cm) 0,0556 (6 cm) 0,0396 (4 cm)	-	57,0 68,75 91,67 137,5

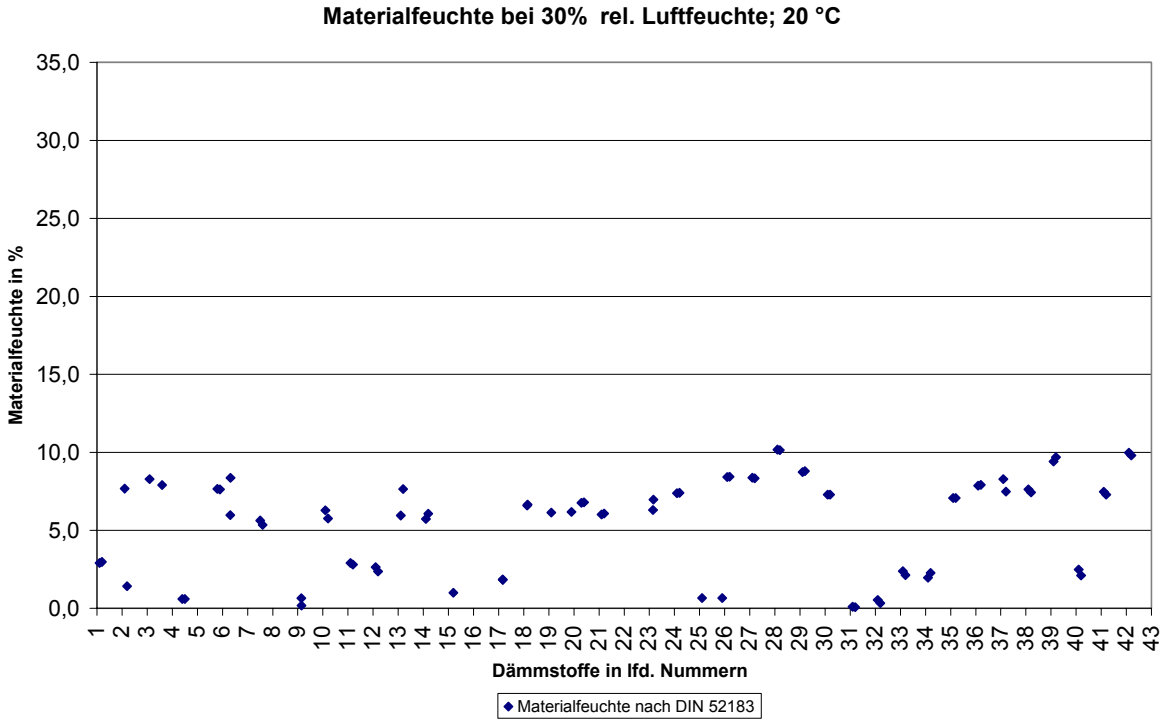
Ergebnisse der Messungen bei 20 °C / 70% rel. Luftfeuchte:

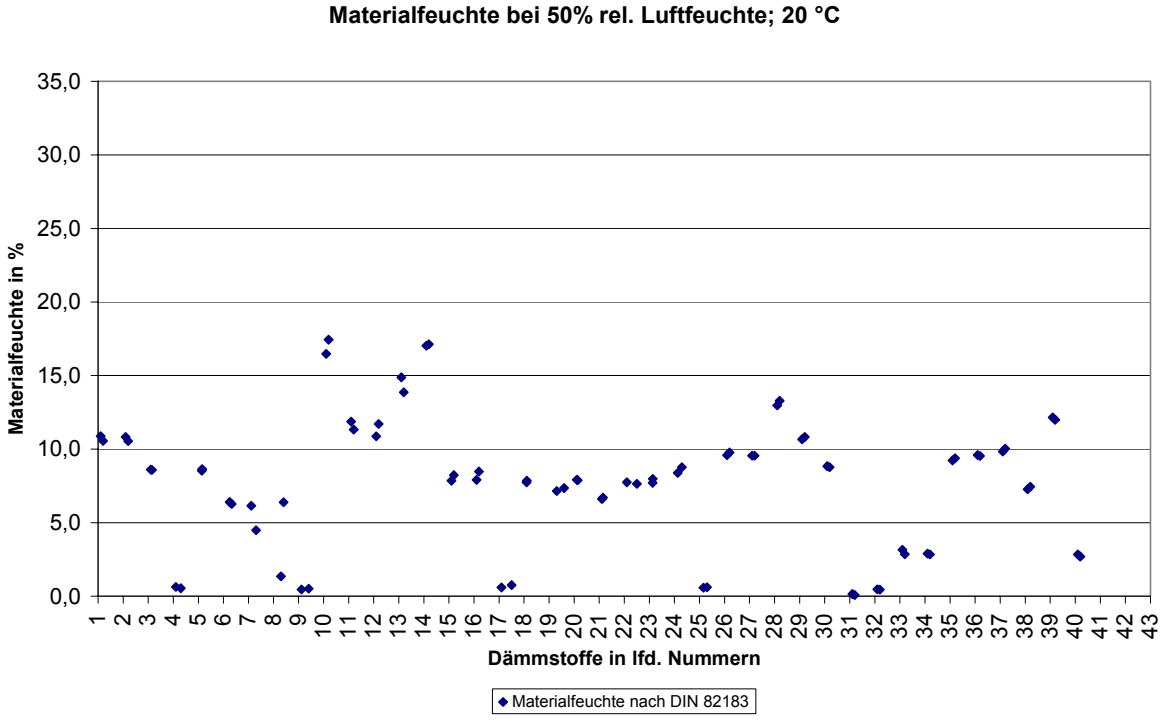
Wärmeleitfähigkeit nach THS [W/(m*K)]	Materialfeuchte [%]	Dichte [kg/m³]
0,0430 (10 cm) 0,0450 (8 cm) 0,0532 (6 cm)	17,0	52,1 65,15 86,86

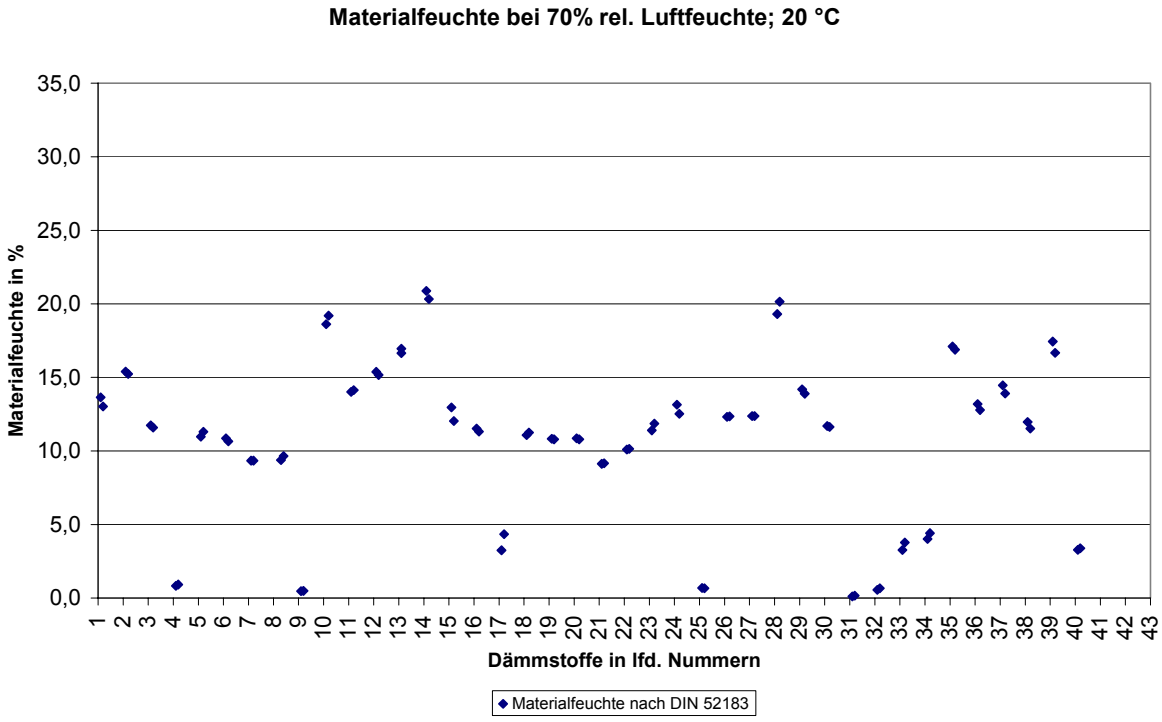

Material 42 - Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20 °C
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0
42 (10cm)
42 (8cm)
42 (6cm)
42 (10cm)
42 (8cm)
42 (6cm)
9,9 %
17 %
Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt

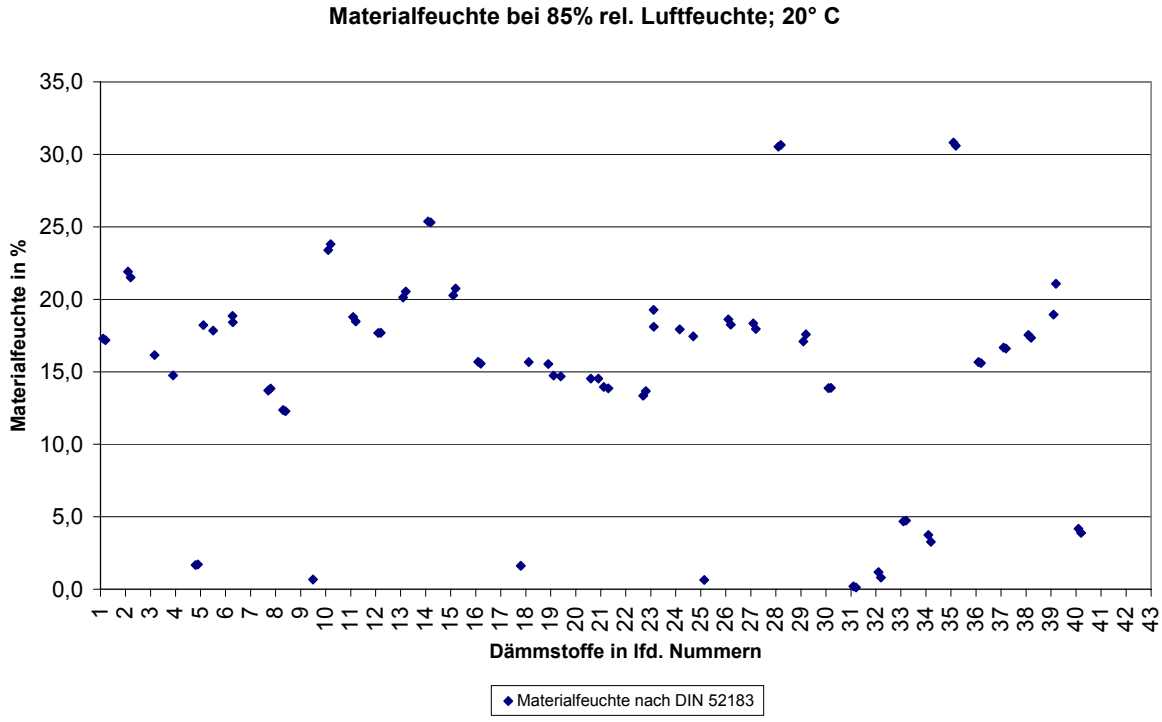

Material 42 - Temperaturleitfähigkeit bei verschiedenen Materialfeuchten, 20° C
Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]
2
1,5
1
0,5
0
42 (10cm)
42 (8cm)
42 (6cm)
42 (10cm)
42 (8cm)
42 (6cm)
42 (10cm)
42 (8cm)
42 (6cm)
9,9 %
17 %
?
Materialfeuchte in %
Temperaturleitfähigkeit mit THS bestimmt

Anlage 2: Materialfeuchte in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte



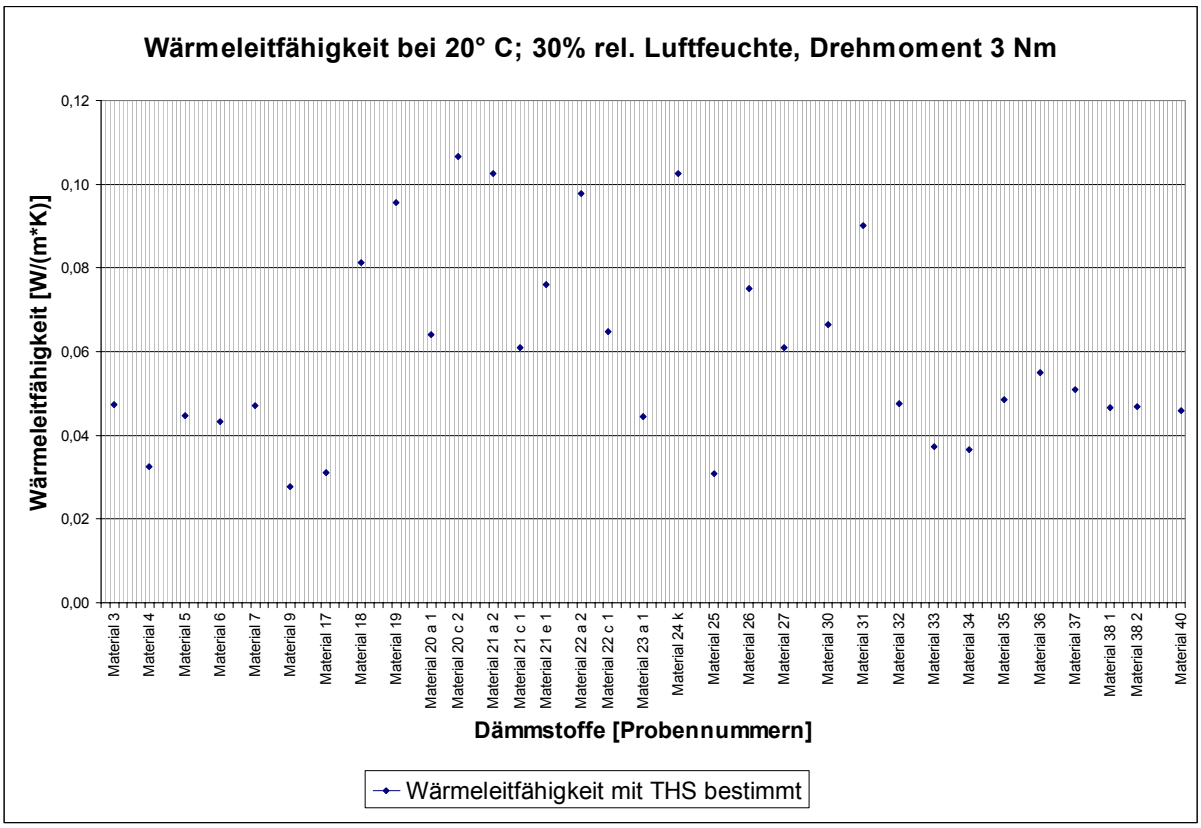


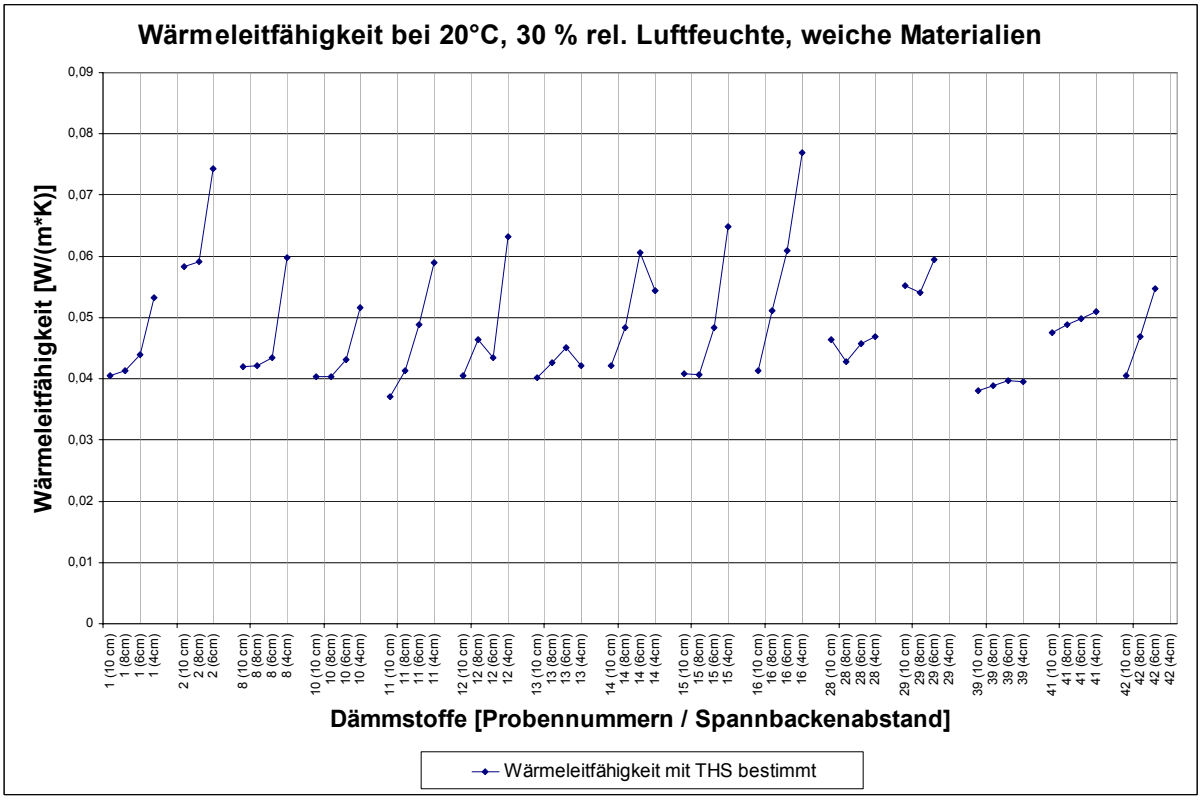

Materialfeuchte bei 70% rel. Luftfeuchte; 20 °C
Materialfeuchte in %
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43
Dämmstoffe in lfd. Nummern
Materialfeuchte nach DIN 52183


Materialfeuchte bei 85% rel. Luftfeuchte; 20° C
Materialfeuchte in %
35,0
30,0
25,0
20,0
15,0
10,0
5,0
0,0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43
Dämmstoffe in lfd. Nummern
Materialfeuchte nach DIN 52183

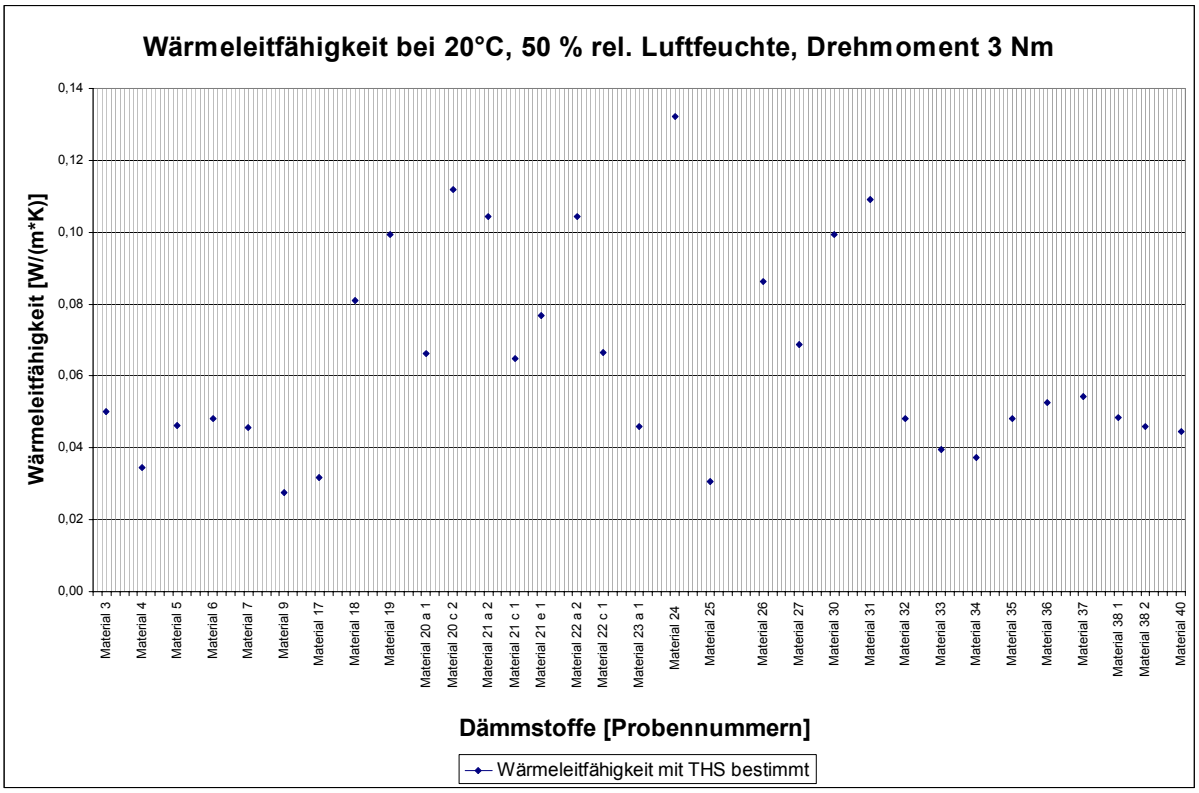
Anlage 3: Zusammenstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten

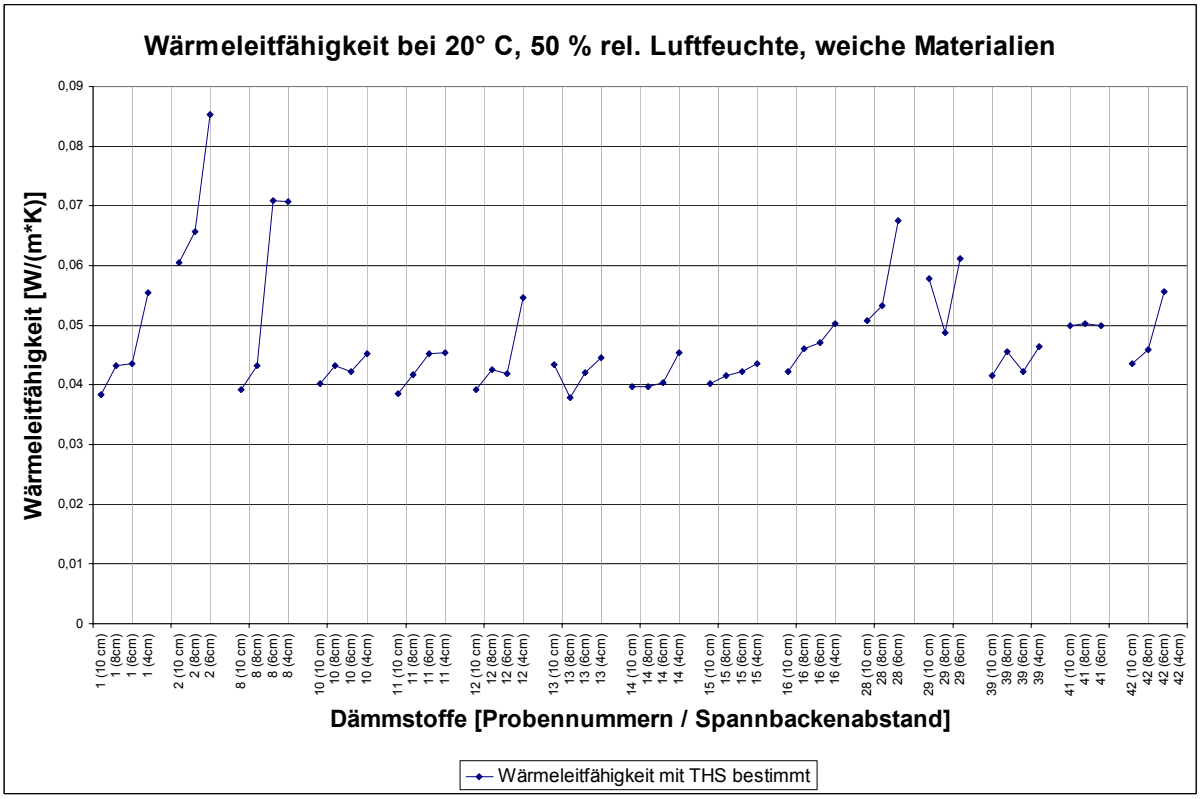
30 % rel. Luftfeuchte



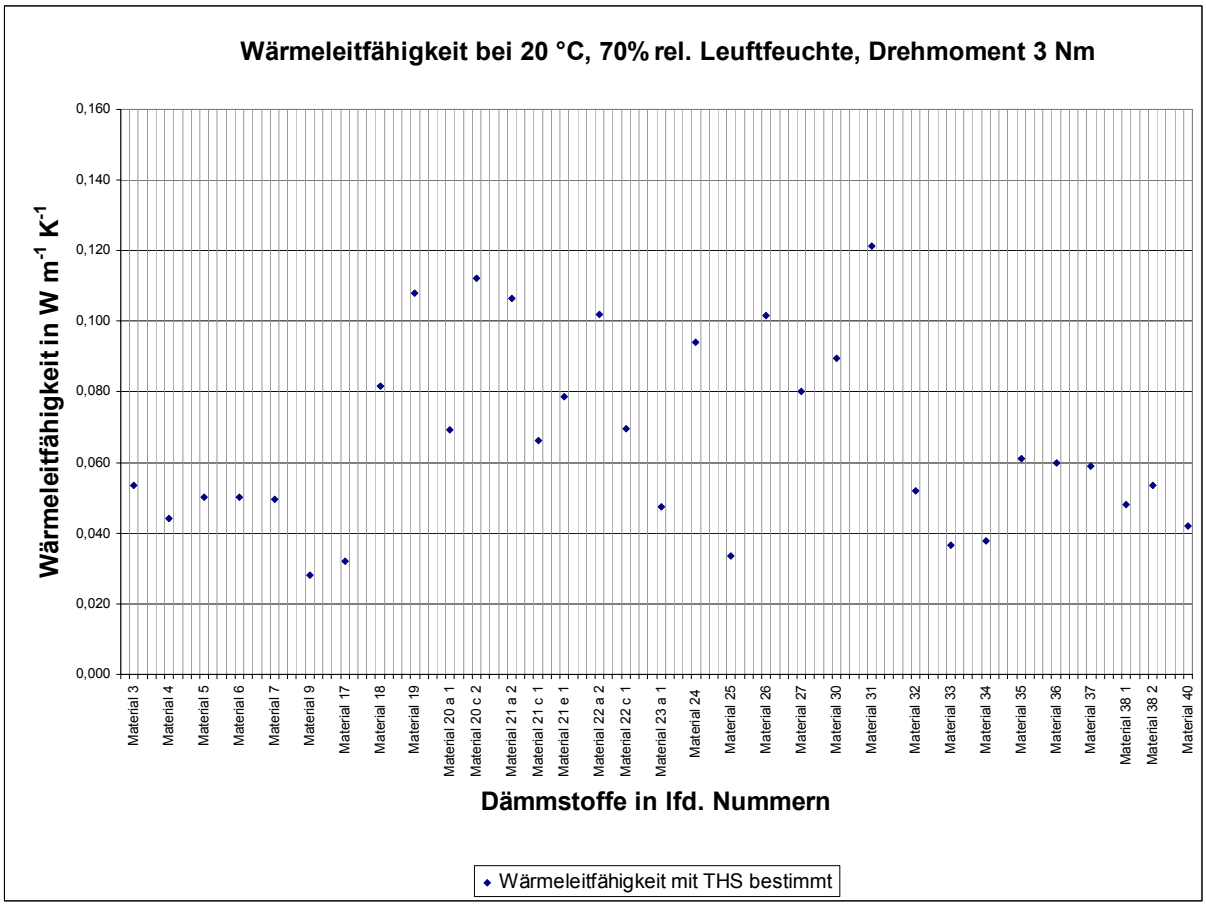


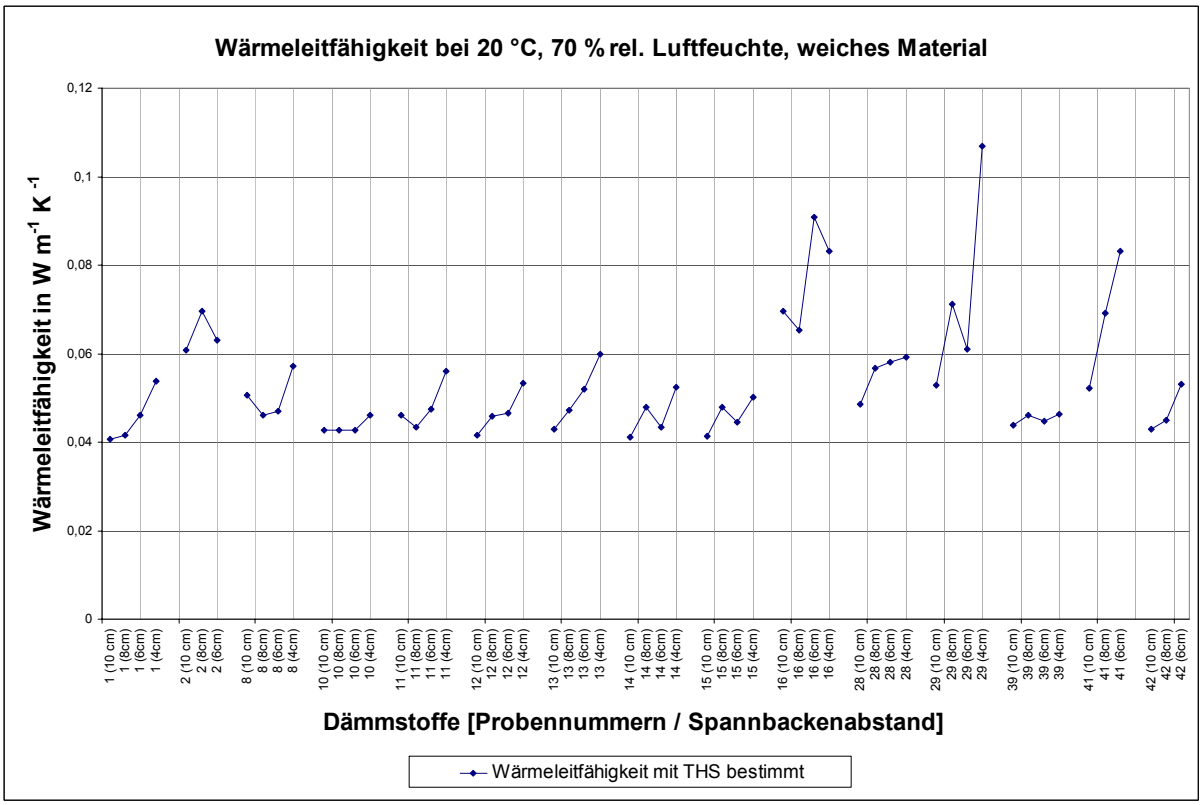
50 % rel. Luftfeuchte



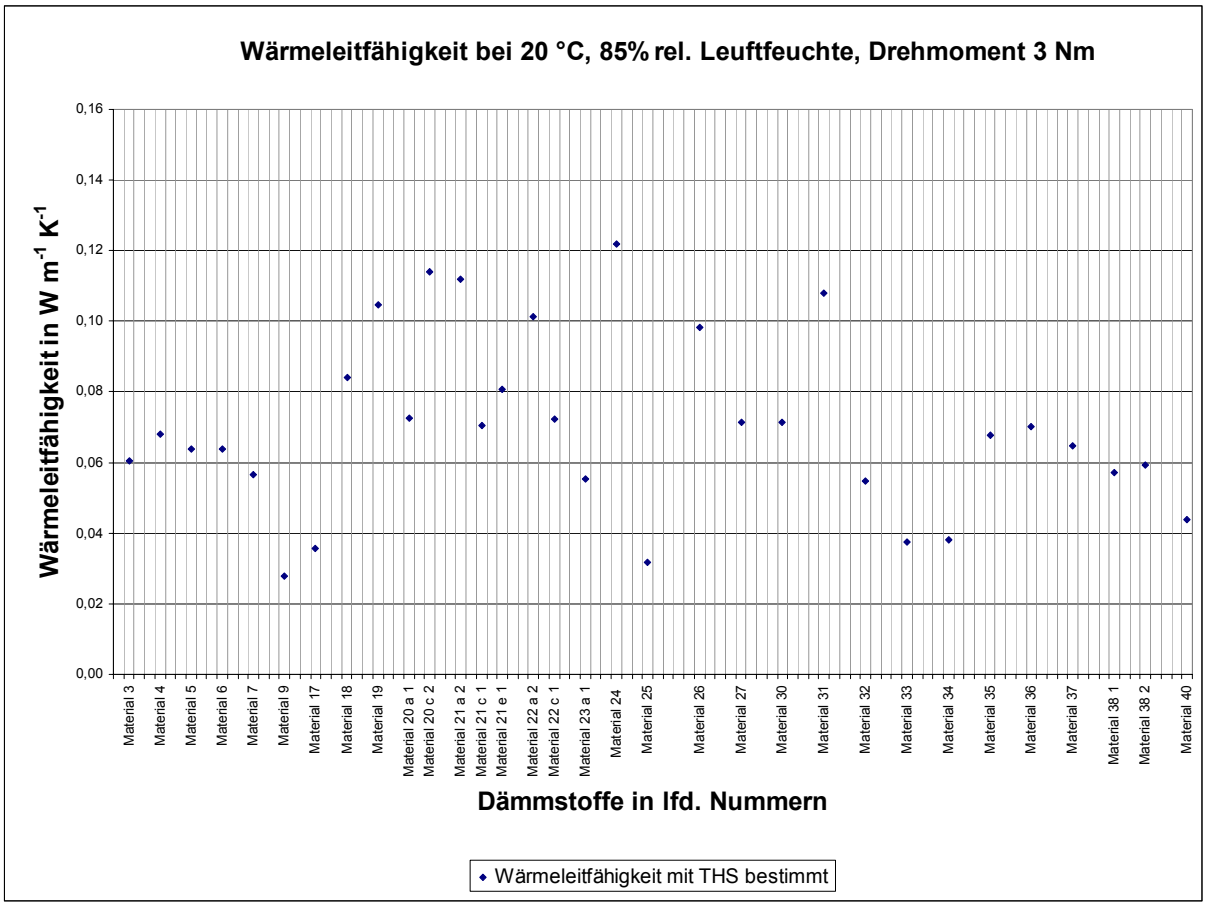


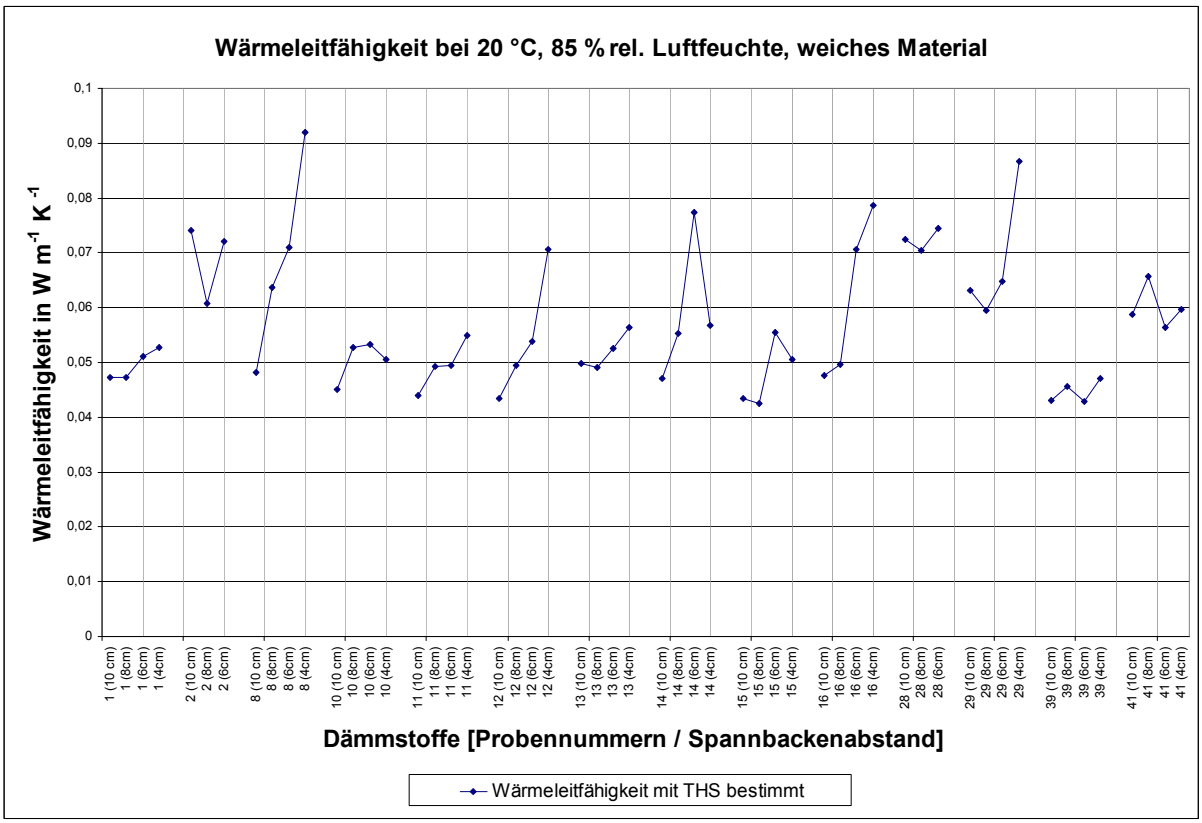
70 % rel. Luftfeuchte





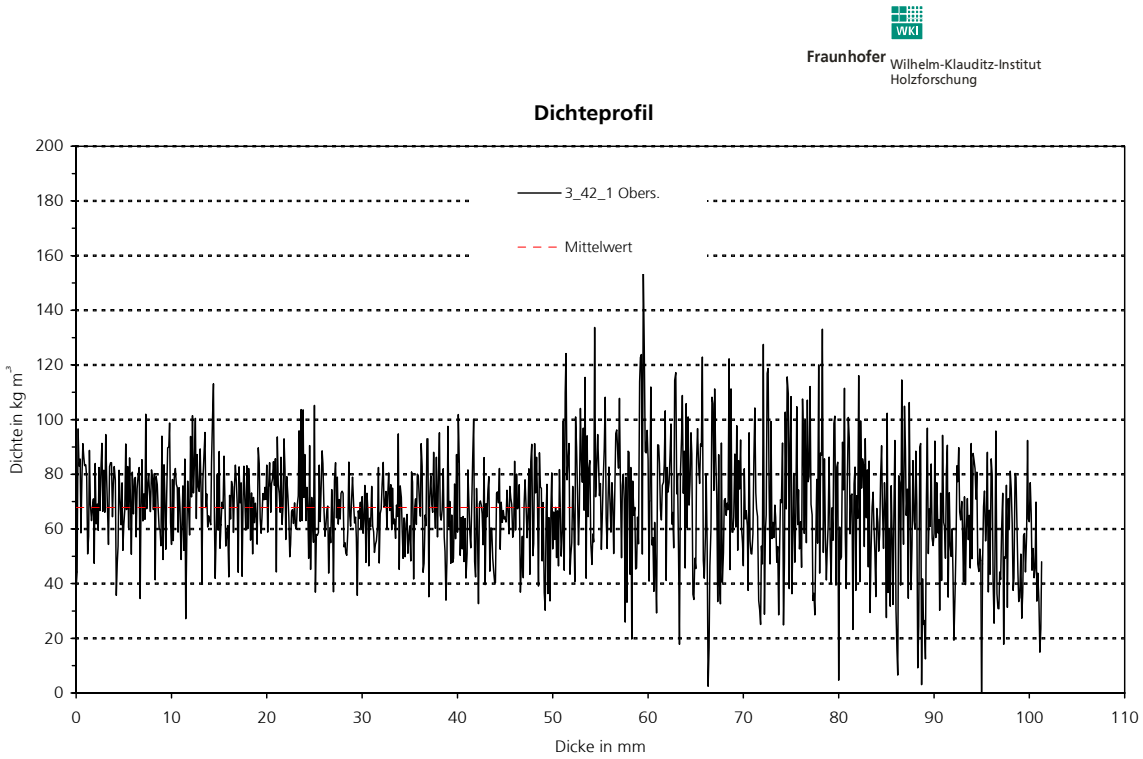
85 % rel. Luftfeuchte



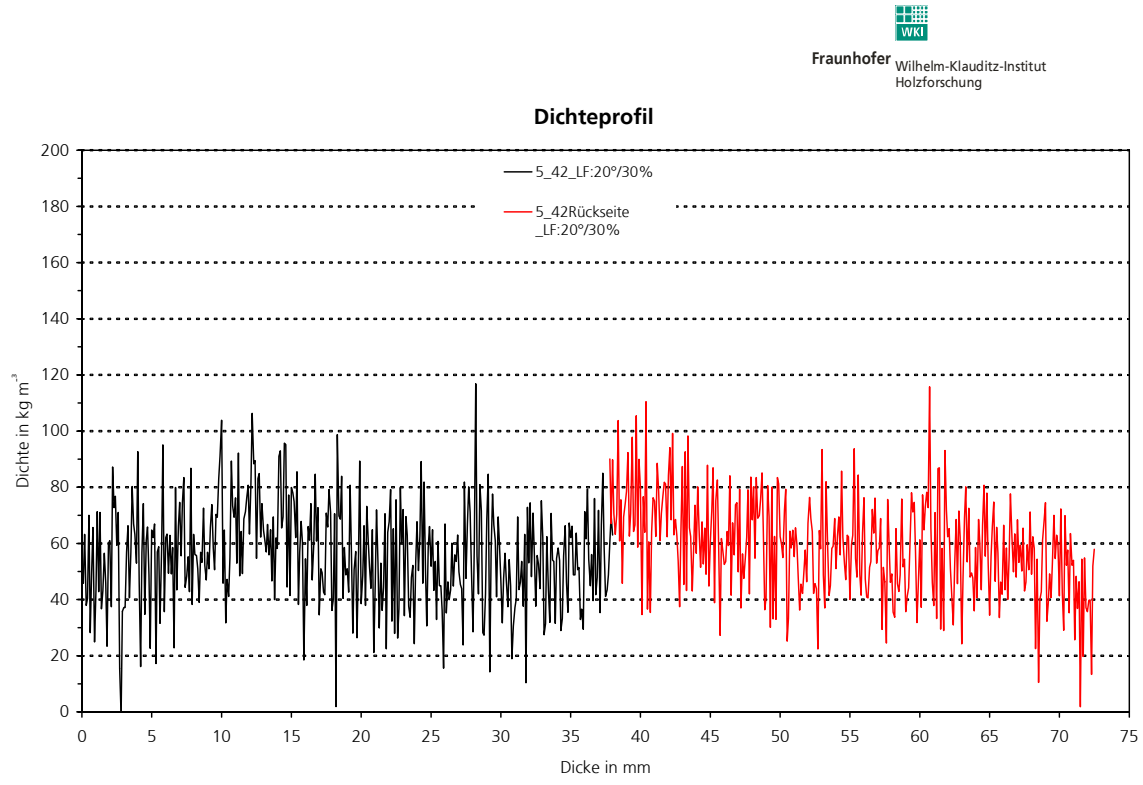


Anlage 4: Rohdichteprofile einiger fester Untersuchungsmaterialien (ohne Schüttgüter)

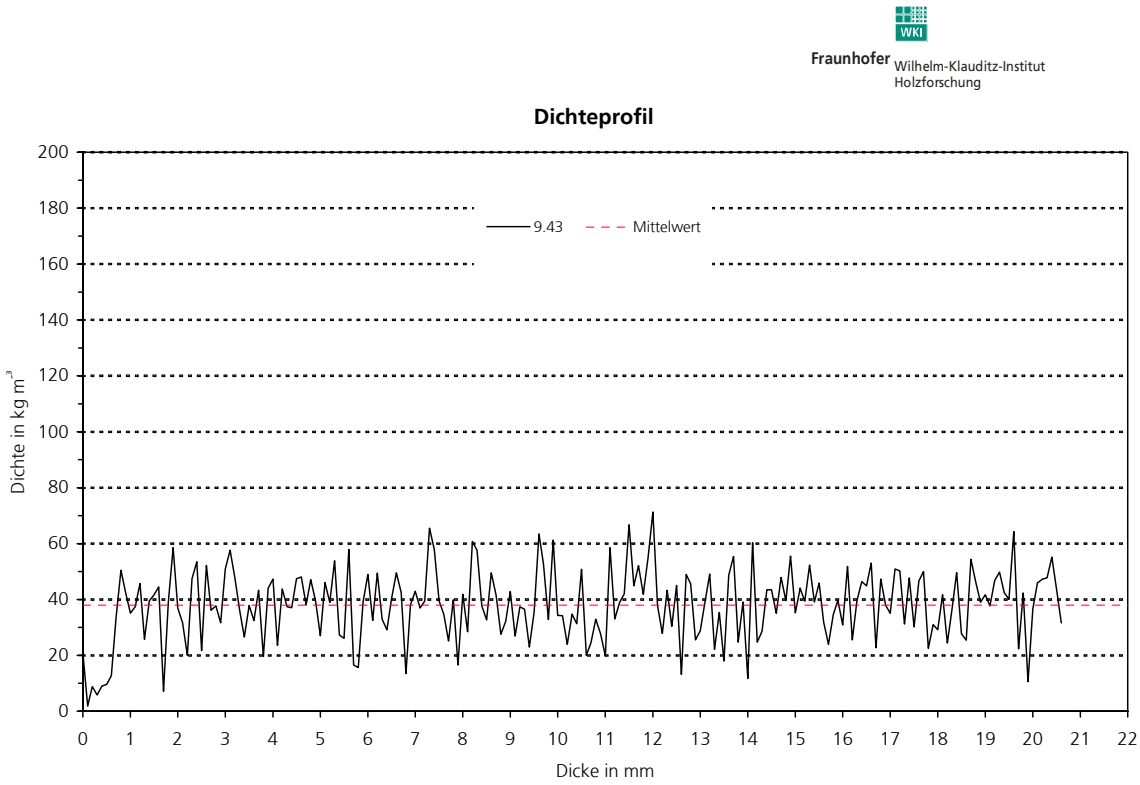
Material 3:



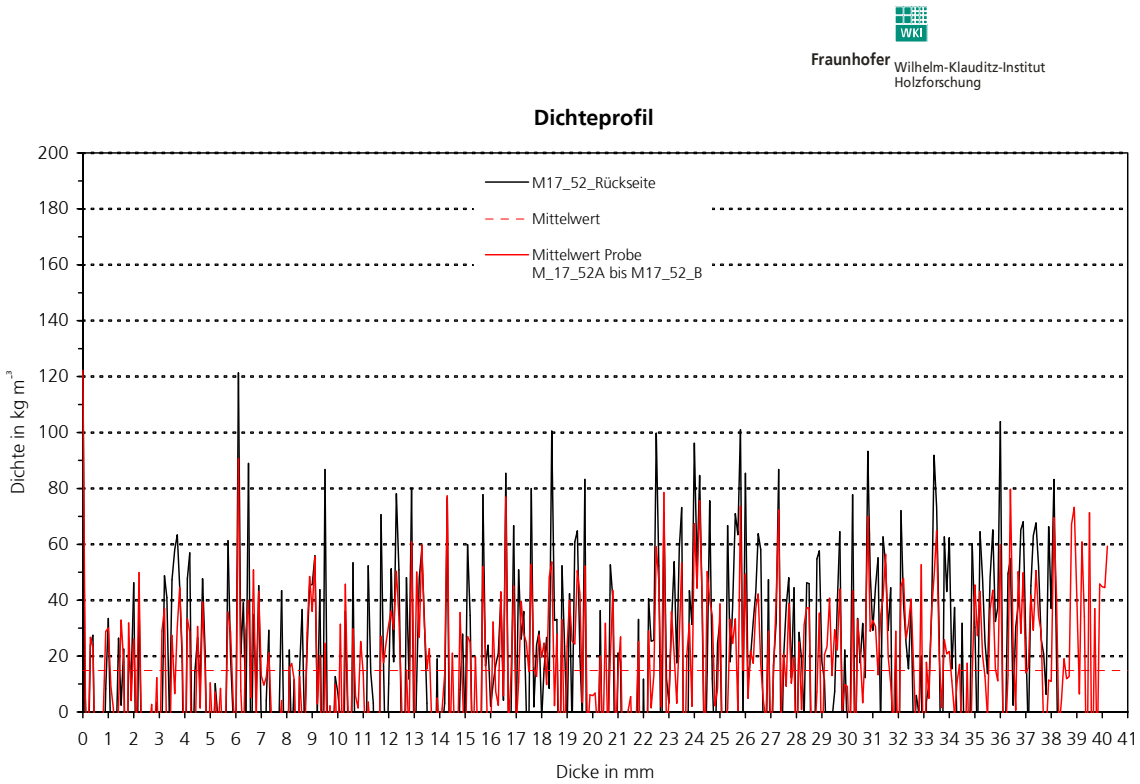
Material 5:



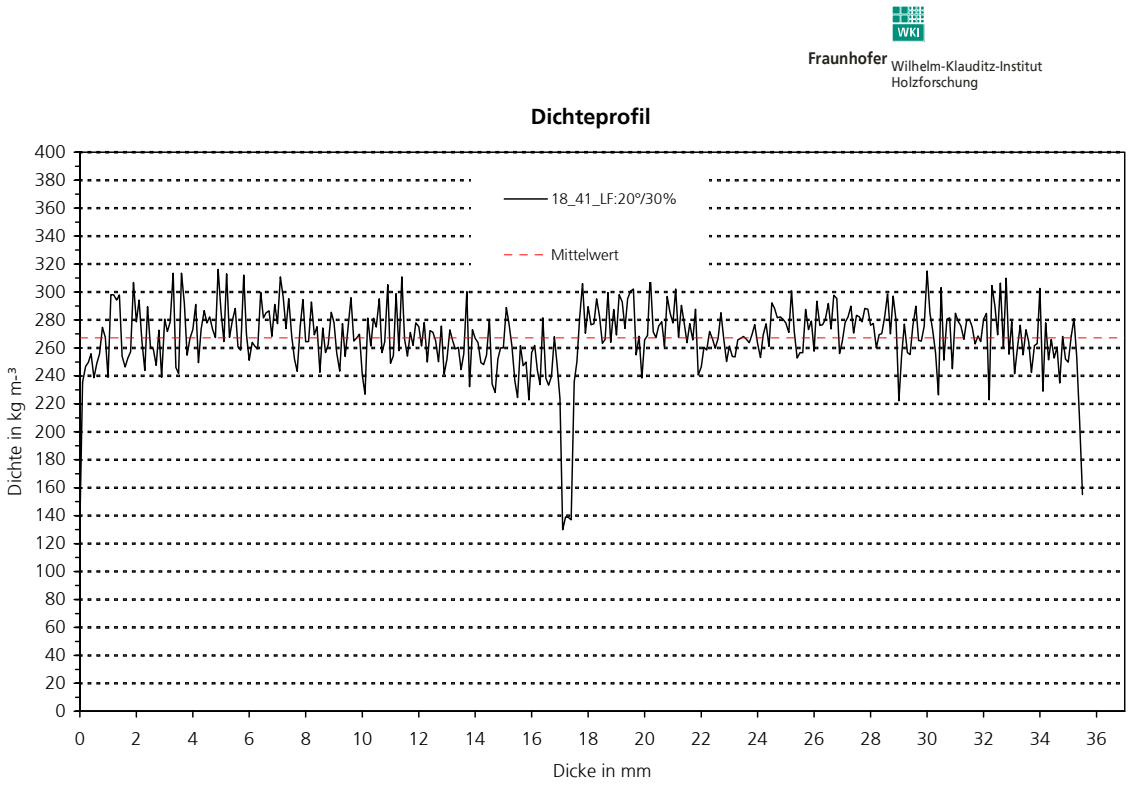
Material 9:



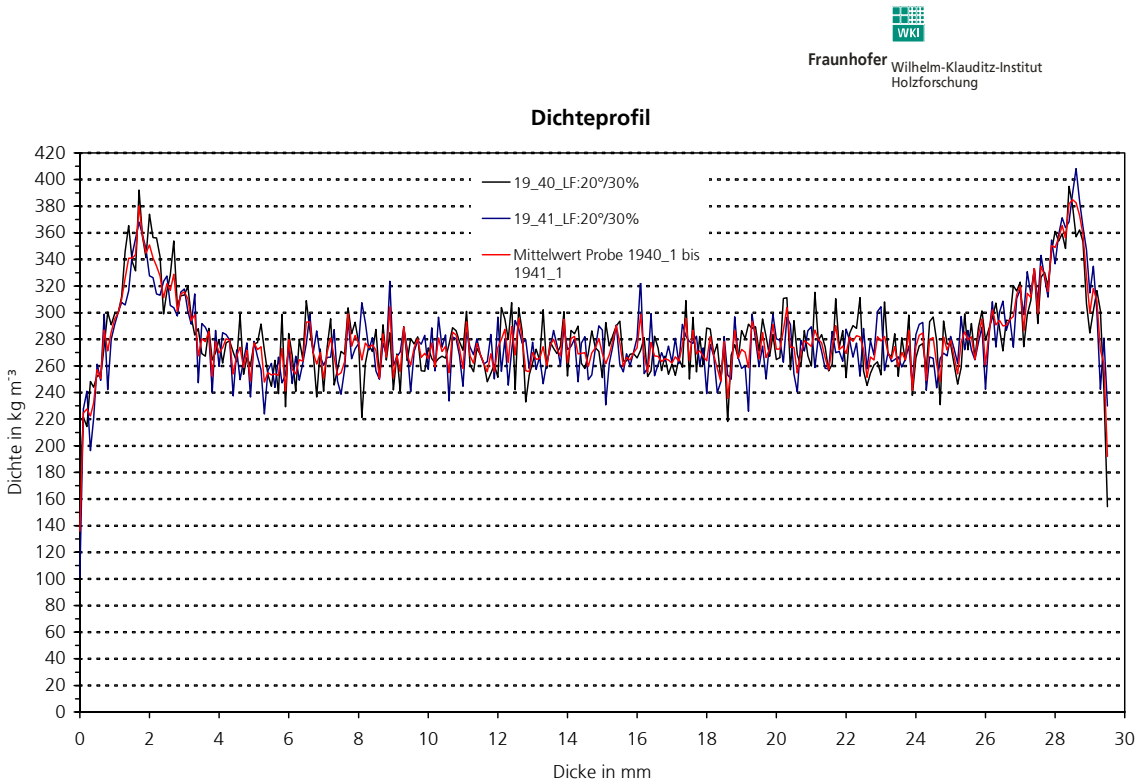
Material 17:



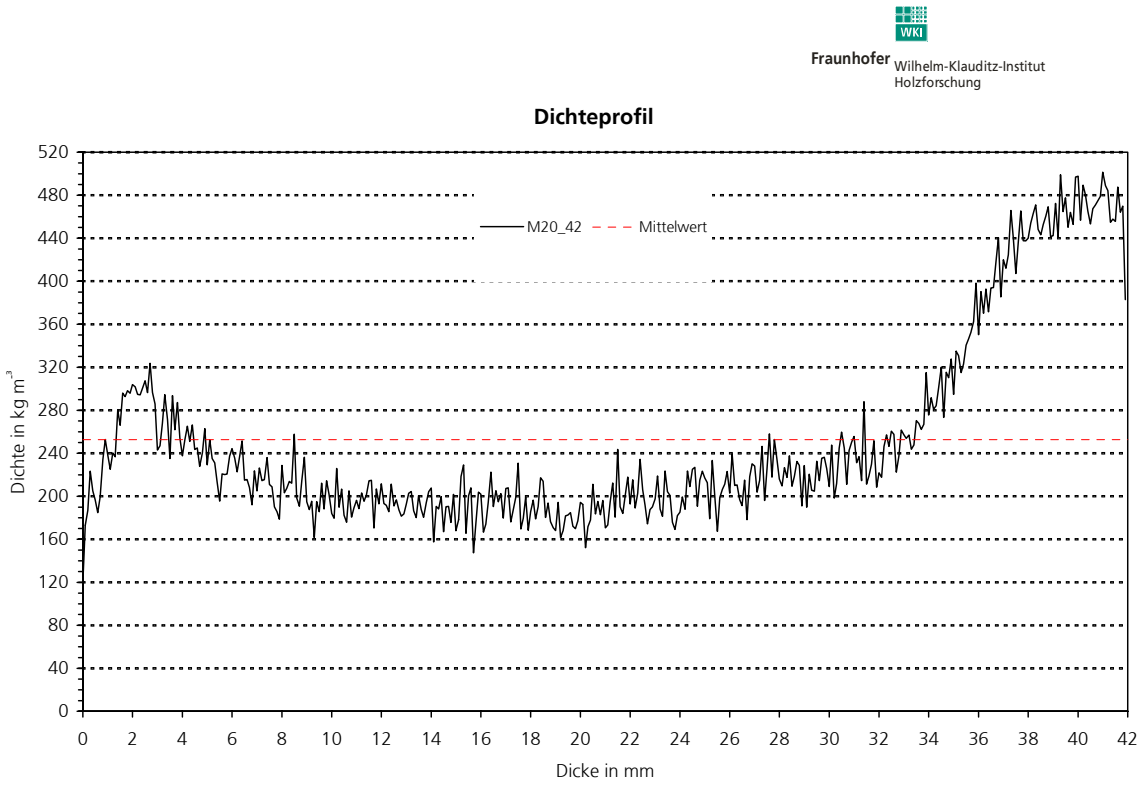
Material 18:



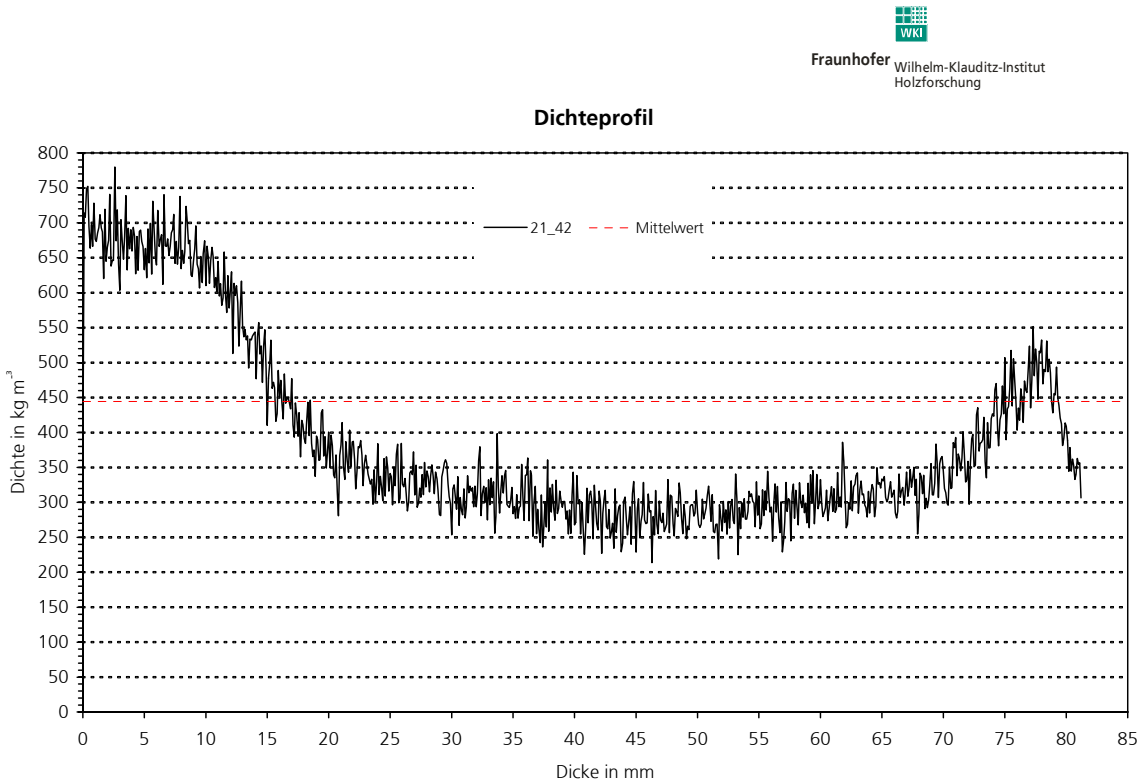
Material 19:



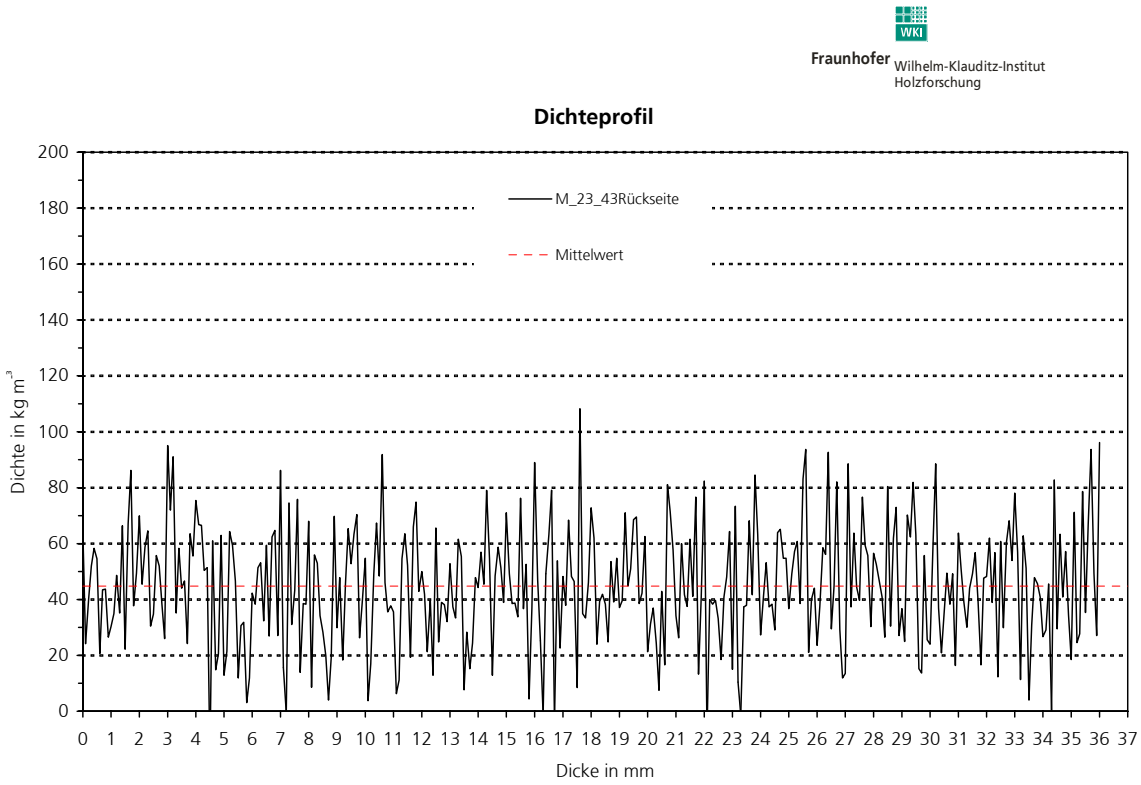
Material 20:



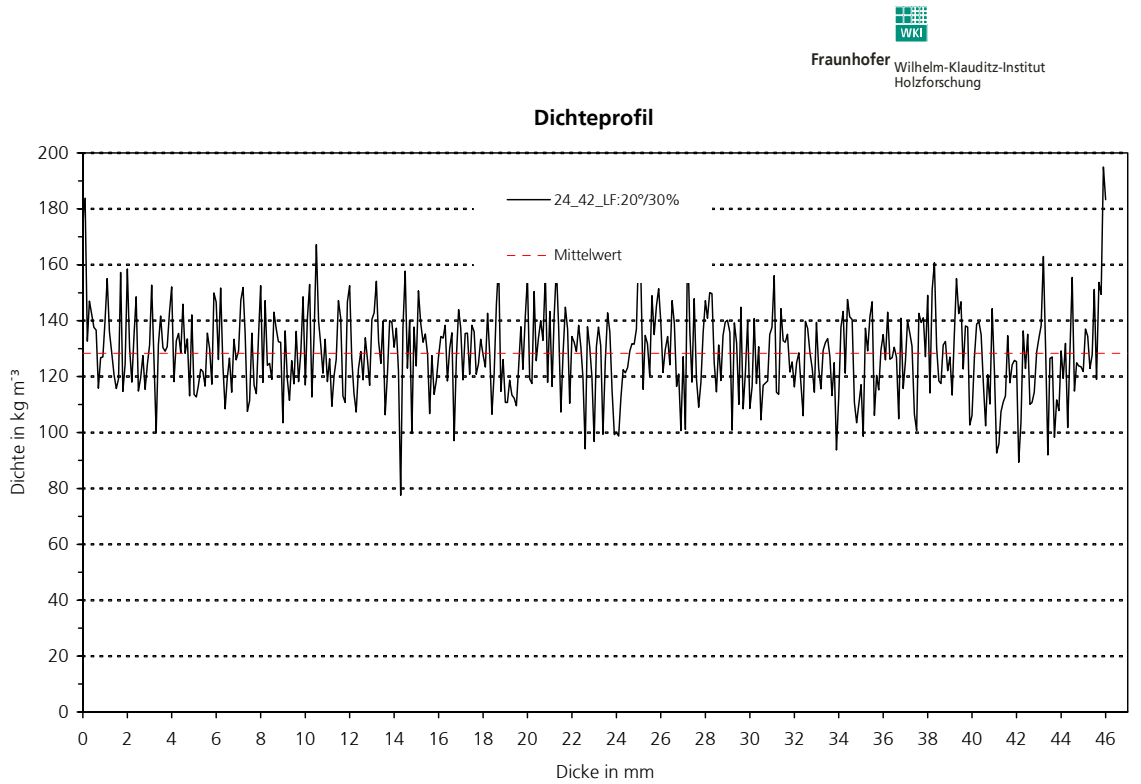
Material 21:



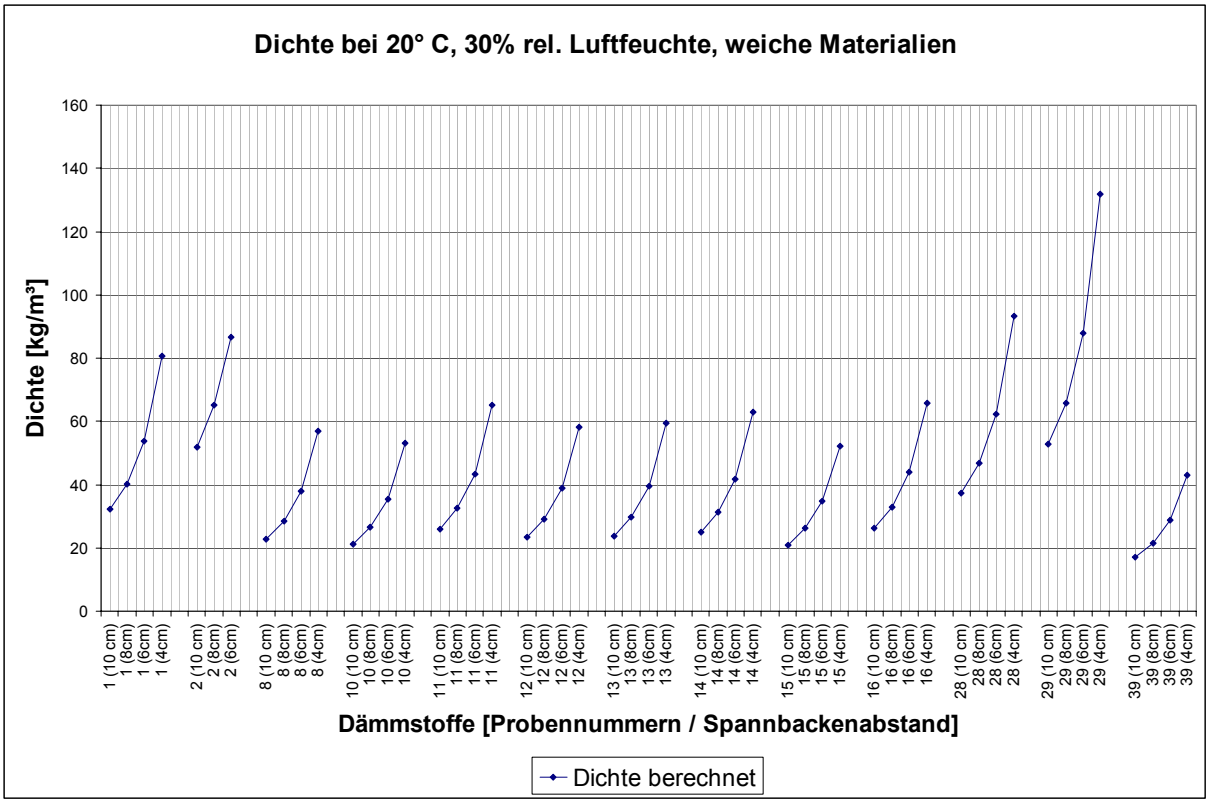
Material 23:

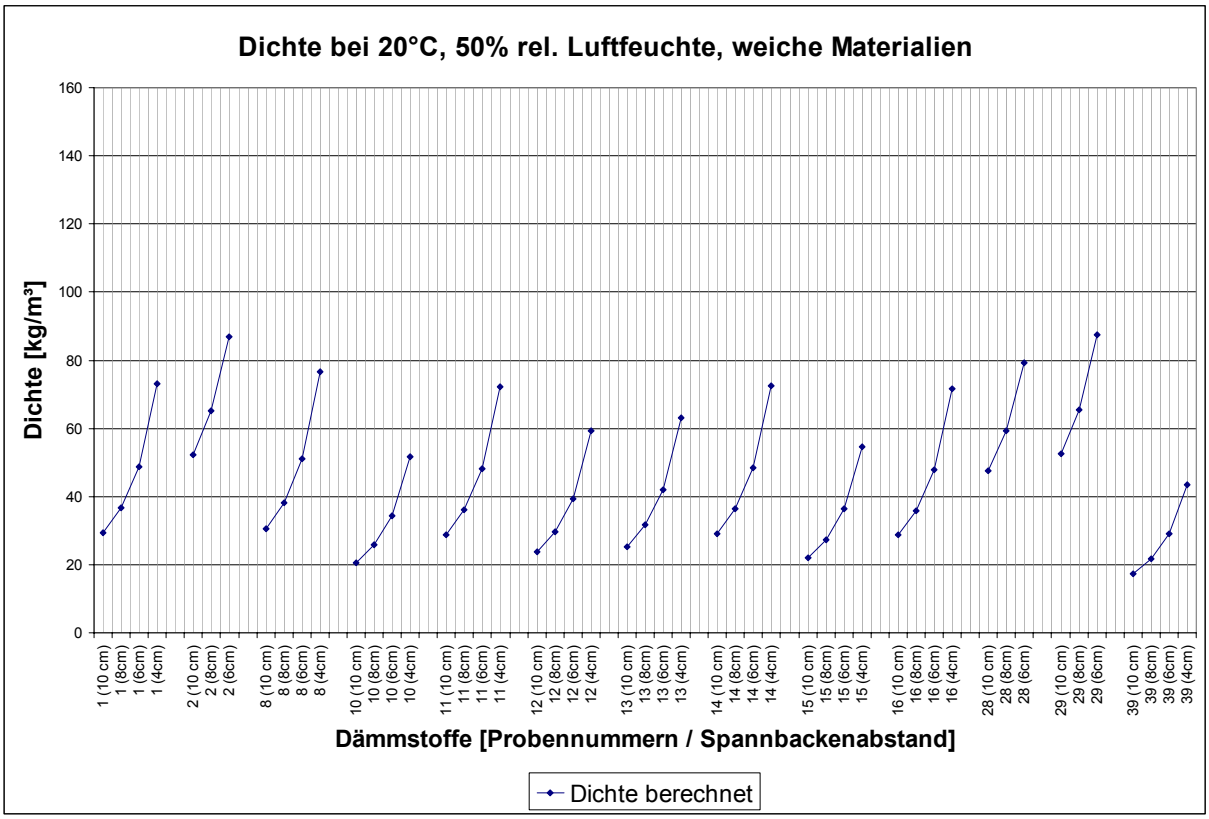


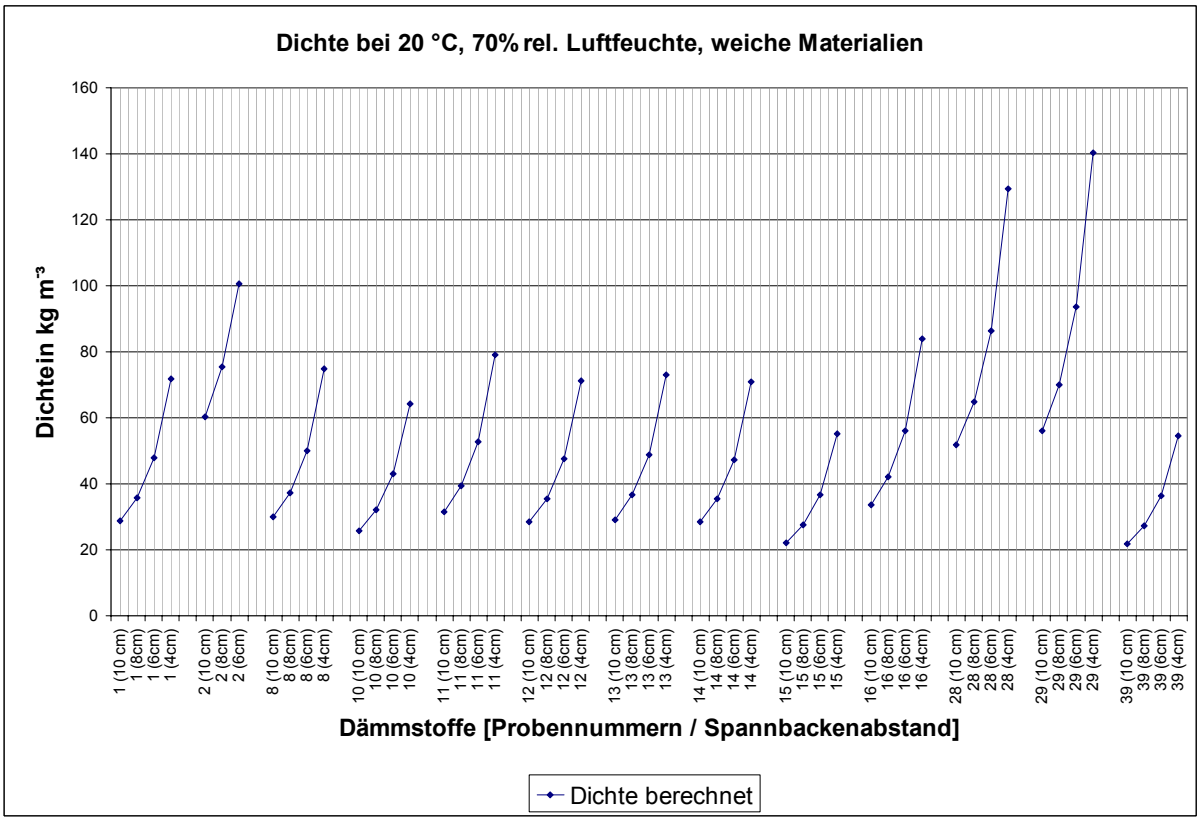
Material 24:

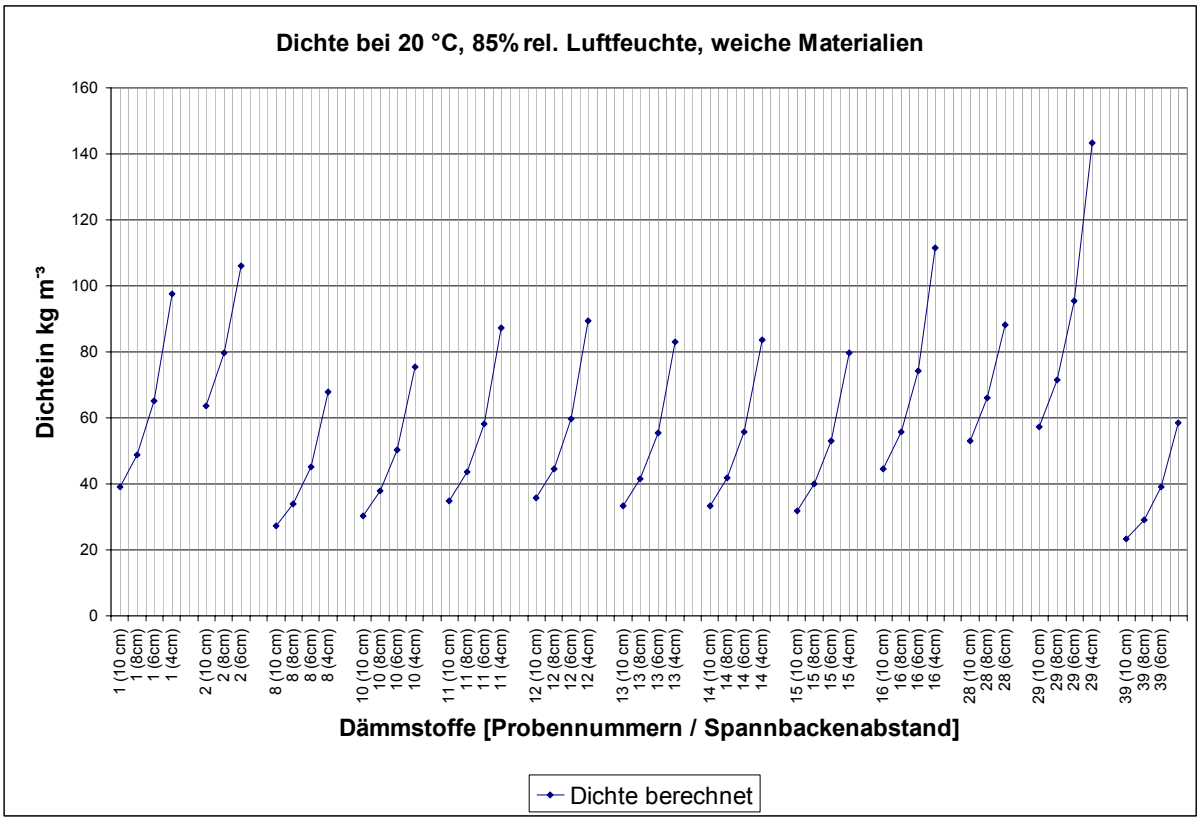


Anlage 5: Dichtezunahme komprimierbarer Untersuchungsmaterialien in Abhängigkeit von der Volumenänderung

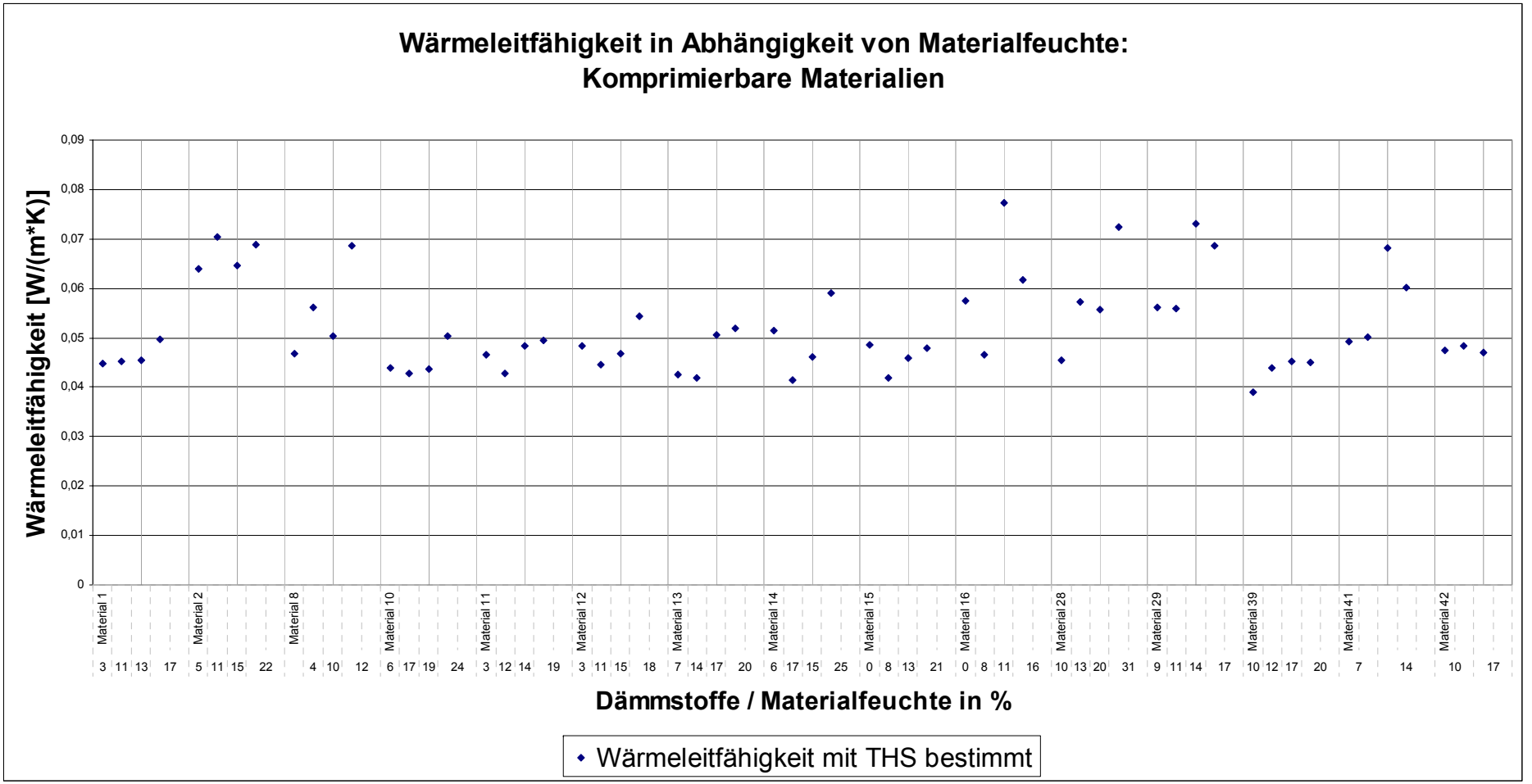


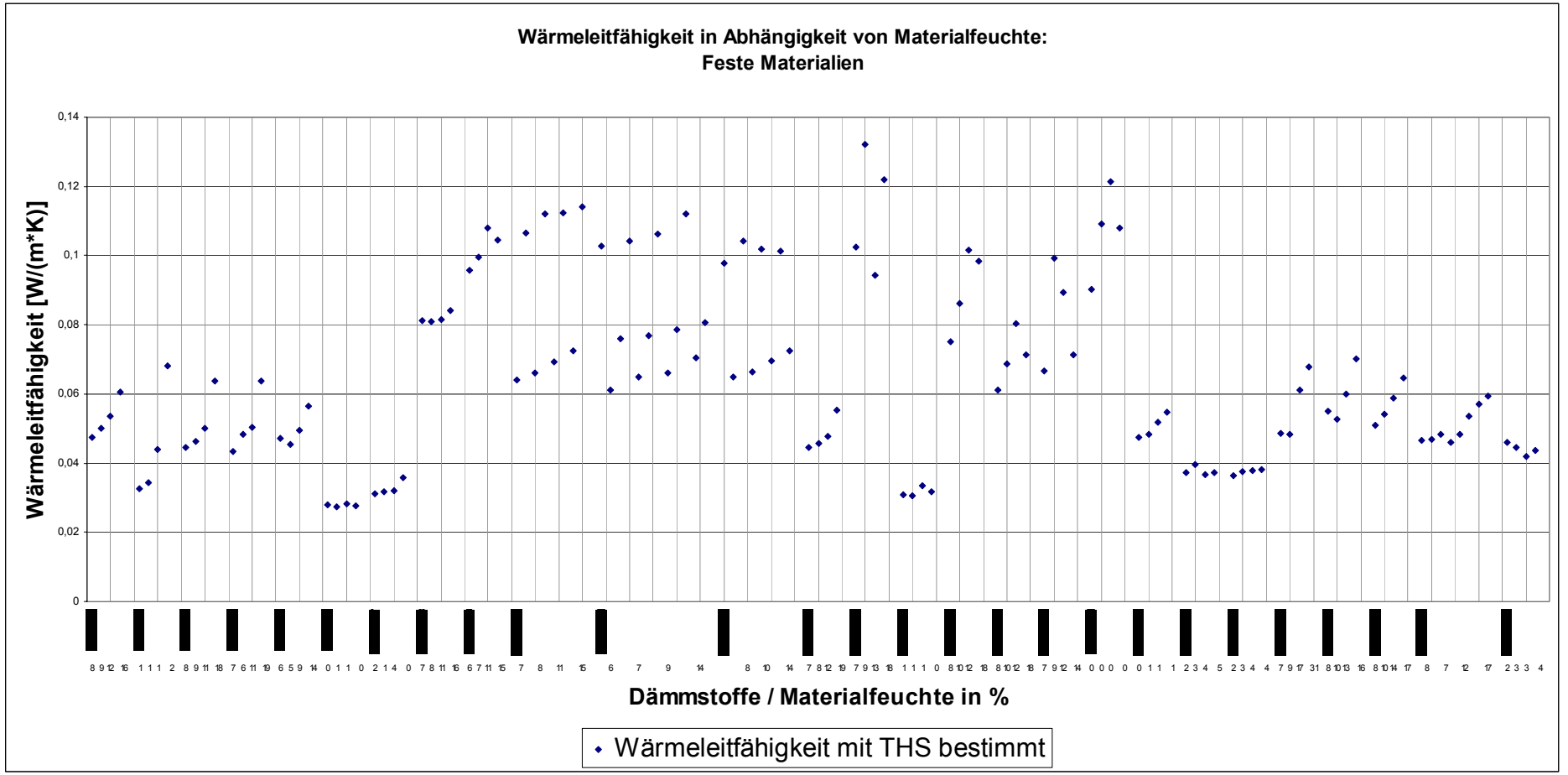

Dichte bei 20°C, 50% rel. Luftfeuchte, weiche Materialien
Dichte [kg/m³]
0
20
40
60
80
100
120
140
160
1 (10 cm)
1 (8cm)
1 (6cm)
1 (4cm)
2 (10 cm)
2 (8cm)
2 (6cm)
8 (10 cm)
8 (8cm)
8 (6cm)
8 (4cm)
10 (10 cm)
10 (8cm)
10 (6cm)
10 (4cm)
11 (10 cm)
11 (8cm)
11 (6cm)
11 (4cm)
12 (10 cm)
12 (8cm)
12 (6cm)
12 (4cm)
13 (10 cm)
13 (8cm)
13 (6cm)
13 (4cm)
14 (10 cm)
14 (8cm)
14 (6cm)
14 (4cm)
15 (10 cm)
15 (8cm)
15 (6cm)
15 (4cm)
16 (10 cm)
16 (8cm)
16 (6cm)
16 (4cm)
28 (10 cm)
28 (8cm)
28 (6cm)
29 (10 cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
39 (10 cm)
39 (8cm)
39 (6cm)
39 (4cm)
Dämmstoffe [Probennummern / Spannbackenabstand]
Dichte berechnet


Dichte bei 20 °C, 70% rel. Luftfeuchte, weiche Materialien
Dichtein kg m⁻³
0
20
40
60
80
100
120
140
160
1 (10 cm)
1 (8cm)
1 (6cm)
1 (4cm)
2 (10 cm)
2 (8cm)
2 (6cm)
8 (10 cm)
8 (8cm)
8 (6cm)
8 (4cm)
10 (10 cm)
10 (8cm)
10 (6cm)
10 (4cm)
11 (10 cm)
11 (8cm)
11 (6cm)
11 (4cm)
12 (10 cm)
12 (8cm)
12 (6cm)
12 (4cm)
13 (10 cm)
13 (8cm)
13 (6cm)
13 (4cm)
14 (10 cm)
14 (8cm)
14 (6cm)
14 (4cm)
15 (10 cm)
15 (8cm)
15 (6cm)
15 (4cm)
16 (10 cm)
16 (8cm)
16 (6cm)
16 (4cm)
28 (10 cm)
28 (8cm)
28 (6cm)
28 (4cm)
29 (10 cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (4cm)
39 (10 cm)
39 (8cm)
39 (6cm)
39 (4cm)
Dämmstoffe [Probennummern / Spannbackenabstand]
Dichte berechnet


Dichte bei 20 °C, 85% rel. Luftfeuchte, weiche Materialien
Dichtein kg m-3
160
140
120
100
80
60
40
20
0
1 (10 cm)
1 (8cm)
1 (6cm)
1 (4cm)
2 (10 cm)
2 (8cm)
2 (6cm)
8 (10 cm)
8 (8cm)
8 (6cm)
8 (4cm)
10 (10 cm)
10 (8cm)
10 (6cm)
10 (4cm)
11 (10 cm)
11 (8cm)
11 (6cm)
11 (4cm)
12 (10 cm)
12 (8cm)
12 (6cm)
12 (4cm)
13 (10 cm)
13 (8cm)
13 (6cm)
13 (4cm)
14 (10 cm)
14 (8cm)
14 (6cm)
14 (4cm)
15 (10 cm)
15 (8cm)
15 (6cm)
15 (4cm)
16 (10 cm)
16 (8cm)
16 (6cm)
16 (4cm)
28 (10 cm)
28 (8cm)
28 (6cm)
29 (10 cm)
29 (8cm)
29 (6cm)
29 (4cm)
39 (10 cm)
39 (8cm)
39 (6cm)
Dämmstoffe [Probennummern / Spannbackenabstand]
Dichte berechnet

Anlage 6: Wärmeleitfähigkeit komprimierbarer und fester Untersuchungsmaterialien in Abhängigkeit von der Materialfeuchte




Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Materialfeuchte:
Feste Materialien
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
0,14
0,12
0,1
0,08
0,06
0,04
0,02
0
Dämmstoffe / Materialfeuchte in %
Wärmeleitfähigkeit mit THS bestimmt