

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik

# Entwicklung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz

Sebastian Ulrich Benedikt Tremel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung,  
Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen  
Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. W. Warkotsch

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. G. Wegener (i. R.)  
2. Univ.-Prof. Dr. J.W. van de Kuilen  
3. apl. Prof. Dr. J. Tröger (i. R.) (Universität Stuttgart)

Die Dissertation wurde am 28.09.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung  
und Umwelt am 20.03.2011 angenommen.



## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik des Forschungsdepartment Ingenieurwissenschaften für Lebensmittel und biogene Rohstoffe am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der Technischen Universität München, in der Zeit von Oktober 2007 bis August 2010. Das Vorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen. Mein Dank gilt insbesondere:

Herrn Prof. Dr. Dr. habil. Drs. h.c. Gerd Wegener für die Themenstellung und die hervorragende Betreuung und Unterstützung der Arbeit;

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan-Willem van de Kuilen für die Übernahme des Zweitkorrektors;

Herrn Prof. Dr. Dr. habil. Johannes Tröger für die wertvollen Anregungen während der Bearbeitung und für die Übernahme des Drittkorrektors;

Herrn Prof. Dr. rer.silv. Walter Warkotsch für den Vorsitz der Prüfungskommission;

Herrn Dipl.-Holzwirt Fritz Tröger für seine Bereitschaft die durchgeführten Untersuchungen immer wieder mit seinem fachlichen Rat kritisch zu reflektieren und für die zeitaufwändige Durchsicht des Manuskripts;

Herrn Prof. Dr. Peter Glos für die Anregungen zur inhaltlichen Gliederung und die kritische Durchsicht des Manuskripts;

Herrn Frank Moosmann und Herrn Robert Meyer für die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Versuche im Labor;

Herrn Markus Säcker für seine zeitaufwändigen Bemühungen um die Ermittlung der Sorptionsisothermen und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen;

Herrn Ralf Rosin danke ich insbesondere für seine Unterstützung bei der photographischen Darstellung der verwendeten Einrichtungen;

Den Mitarbeitern der Werkstätten, den Herren Bruno Fischer, Roland Braun, Wolfgang Weber und Manfred Reichenbacher für die Unterstützung bei der Planung und Durchführung des notwendigen Vorrichtungsbaus.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, sowie meiner Freundin Susanne, die mir stets eine moralische Stütze sind.

Augsburg, 02.09.2010

Sebastian Tremel

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>i</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>vi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xii</b>
<b>Einheiten, Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Aufgaben des baulichen Wärmeschutzes</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Wohnhygienische Verhältnisse .....	1
1.1.2 Vermeidung von Feuchteschäden in der Konstruktion.....	2
1.1.3 Energieeinsparung durch Wärmedämmmaßnahmen .....	2
<b>1.2 Marktentwicklungen</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3 Dämmstoffe auf Basis von Hobel- und Sägewerksnebenerzeugnissen</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Zielsetzung</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Problemstellung</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2 Projektziele</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3 Untersuchungsbedarf</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Wärmeübertragung.....	10
3.1.2 Zur Volumenstabilität loser Dämmstoffe.....	15
3.1.3 Brandverhalten .....	22
3.1.4 Hygroskopisches Verhalten.....	23
3.1.5 Materialcharakterisierung disperser Systeme .....	24
3.1.6 Kompositdämmstoffe – Feststoffmischen.....	26
<b>3.2 Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 Einteilung von Dämmstoffen.....	27
3.2.2 Einsatz von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe.....	28
<b>4 Material und Methoden</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1 Materialcharakterisierung</b> .....	<b>32</b>
4.1.1 Material für das Material- und Methodenscreening .....	32
4.1.1.1 Materialbeschreibung .....	32
4.1.1.2 Homogenisierung und Klimatisierung des Ausgangsmaterials .....	40
4.1.1.3 Streudichte.....	41
4.1.1.4 Siebanalyse .....	42
4.1.2 Material für die Versuche mit ausgewählten Materialvarianten.....	44
4.1.2.1 Materialbeschreibung .....	44
4.1.2.2 Streudichte.....	45
4.1.2.3 Siebanalysen .....	45
<b>4.2 Methoden</b> .....	<b>51</b>
4.2.1 Beschreibung genormter und bekannter Methoden .....	51
4.2.1.1 Probenziehung und Probenteilung .....	51
4.2.1.2 Bestimmung der Materialfeuchte.....	52

4.2.1.3	Ermittlung der Siebkennlinie (DIN 66165) .....	52
4.2.1.4	Ermittlung der Schüttdichte .....	53
4.2.1.5	Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit (DIN 52612) .....	54
4.2.1.6	Ermittlung des Brandverhaltens (DIN 4102-1) .....	56
4.2.1.7	Ermittlung der Sorptionsisothermen .....	57
4.2.1.8	Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (in Anlehnung an DIN EN ISO 12572).....	59
4.2.1.9	Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes (DIN EN 29053).....	61
4.2.1.10	Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit.....	62
4.2.2	Beschreibung spezifisch entwickelter Methoden.....	63
4.2.2.1	Entwicklung einer Methodik zur Prüfung der Volumenstabilität von losen Dämmstoffen auf einem Kleinprüfstand .....	63
4.2.2.2	Untersuchungen zum Kompressionsverhalten.....	72
4.2.2.3	Prüfung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393.....	73
4.2.2.4	Ermittlung der Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen im Material .....	79
4.2.2.5	Ermittlung der Mischgüte .....	82
4.2.2.6	Untersuchungen zum Temperaturverhalten der Dämmschicht (Temperaturamplitudenverhältnis).....	83
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>86</b>
<b>5.1</b>	<b>Material- und Methodenscreening .....</b>	<b>86</b>
5.1.1	Volumenstabilität der Einzelmaterialien ermittelt auf dem Kleinprüfstand .....	86
5.1.2	Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien .....	90
5.1.3	Überlegungen zur Kompositbildung – Bestimmung des Mischungsverhältnisses.....	93
5.1.4	Versuche zur Kompositbildung – Bestimmung der Mischgüte in einem diskontinuierlich arbeitenden Trommelmischer .....	94
5.1.5	Volumenstabilität der Mischungen, ermittelt auf dem Kleinprüfstand .....	97
5.1.6	Orientierende Aussagen zum hygroskopischen Verhalten .....	100
5.1.7	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Materialscreening.....	101
5.1.8	Auswahl der Materialien für weiterführende Versuche.....	102
<b>5.2</b>	<b>Versuche mit ausgewählten Materialvarianten .....</b>	<b>102</b>
5.2.1	Untersuchte Mischungsverhältnisse.....	104
5.2.2	Mischgütebestimmung.....	105
5.2.3	Wärmeleitfähigkeit .....	106
5.2.4	Temperaturverhalten der Dämmschicht .....	113
5.2.5	Strömungswiderstand .....	118
5.2.6	Setzungsverhalten .....	121
5.2.6.1	Kleinversuche entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.1 .....	121
5.2.6.1.1	Zusammenhang zwischen Streudichte und Setzungsdichte.....	122
5.2.6.1.2	Zusammenhang zwischen Setzungsdichte und Mischungsverhältnis .....	123
5.2.6.1.3	Zusammenhang zwischen Startdichte und Mischungsverhältnis.....	131
5.2.6.2	Bauteilversuche mit dem kleinen Gefach .....	132
5.2.6.2.1	Vergleich des Belastungsniveaus der durchgeführten Schwingungs- und Fallversuche .....	132
5.2.6.2.2	Prozentuale Dichteerhöhung während des Versuchs, bezogen auf die erreichte Setzungsdichte .....	142
5.2.6.2.3	Dichteprofil über der erreichten Setzungshöhe .....	144

---

5.2.6.2.4	Zusammenhang zwischen Streudichte und Mischungsverhältnis sowie Setzungsdichte und Mischungsverhältnis, in Gegenüberstellung zu den auf dem Kleinprüfstand erzielten Werten .....	151
5.2.6.3	Versuche zum Kompressionsverhalten .....	154
5.2.6.4	Untersuchungen zur Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen im Material ....	155
5.2.6.4.1	Orientierende Untersuchungen zur Messung der Schwingungsübertragung bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen .....	156
5.2.6.4.2	Messung der Schwingungsübertragung bei sukzessiv steigender Einbringdichte .	157
5.2.6.4.3	Messung der Schwingungsübertragung bei unterschiedlicher Materialfeuchte	163
5.2.7	Hygroskopisches Verhalten .....	163
5.2.7.1	Sorptionsisothermen .....	163
5.2.7.2	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl .....	166
5.2.8	Brandverhalten (B2-Prüfung) .....	171
5.2.9	Versuche zur Schimmelpilzbeständigkeit .....	173
5.2.10	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse der Versuche mit ausgewählten Materialvarianten .....	177
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>180</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>182</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>XI</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Verteilung des Endenergieverbrauchs auf Verbrauchersektoren in Deutschland von 1990 – 2008.....	4
Abbildung 1-2 Links: Endenergieverbrauch [%] aufgeteilt auf Anwendungsfelder; Rechts: Raumheizwärmebedarf aufgeteilt auf die Verbrauchersektoren im Jahr 2007 (eigene Darstellung nach Tzscheutschler et al. 2009).....	5
Abbildung 2-1 Mögliche Eigenschaftsverläufe bei Mischungen zweier Materialien „A“ und „B“ .....	9
Abbildung 3-1 Abhängigkeit der Wärmeleitzahl von der Rohdichte (Darstellung aus KOLLMANN UND MALMQUIST 1956) .....	12
Abbildung 3-2 Verlauf experimentell ermittelter Isothermen nach IUPAC .....	23
Abbildung 3-3 Anwendungsgebiete von Dämmstoffen in Gebäuden, alternative Dämmstoffe: fett und umrahmt (Darstellung aus: ALBRECHT 1997) .....	29
Abbildung 4-1 Materialprobe 01 FES .....	33
Abbildung 4-2 Materialprobe 02 Fichte Hobelspan .....	33
Abbildung 4-3 Materialprobe 03 Fichte Bandsägespan .....	34
Abbildung 4-4 Materialprobe 04 Lärche Hobel-/Bandsägespan .....	34
Abbildung 4-5 Materialprobe 05 Fichte Kreissägespan .....	35
Abbildung 4-6 Materialprobe 06 Hobeldämmspangemisch .....	35
Abbildung 4-7 Materialprobe 07 Holzstoff .....	36
Abbildung 4-8 Materialprobe 08 Faserstoff .....	36
Abbildung 4-9 Materialprobe 09 Altpapierflocken.....	37
Abbildung 4-10 Materialprobe 10 Wiesengrasdämmstoff .....	37
Abbildung 4-11 Materialprobe 11 Miscanthusspäne .....	38
Abbildung 4-12 Materialprobe 12 Hanfschäben .....	38
Abbildung 4-13 Materialprobe 13 Hanffasern.....	39
Abbildung 4-14 Materialprobe 14 Flachsschäben .....	39
Abbildung 4-15 Materialprobe 15 Flachsfasern.....	40
Abbildung 4-16 FES 01: Links: Spanform glatt, Rechts: Spanform gewellt .....	41
Abbildung 4-17 Siebkennlinie des Materials FES 01 (Massenverteilungssumme $Q_{m,i}$ ).....	42
Abbildung 4-18 Siebfraktionen des Materials 01 FES.....	43
Abbildung 4-19 Mittlere Massenverteilungssumme aufgetragen über der Siebmaschenweite .....	46
Abbildung 4-20 Siebrückstände des Materials H01 FES .....	47
Abbildung 4-21 Siebrückstände des Materials H02 Fichte Hobelspan .....	48
Abbildung 4-22 Siebrückstände des Materials H08 Faserstoff .....	49
Abbildung 4-23 Siebrückstände des Materials H09 Altpapierflocken.....	50
Abbildung 4-24 Prinzip der Einengung einer Sammelprobe durch Vierteln .....	51
Abbildung 4-25 Traversierende Vibrationsrinne mit zylinderförmigem Auffanggefäß.....	54
Abbildung 4-26 Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Taurus TLP 500-H; Anordnung von Kühl- und Heizplatte mit eingebauter Probe (Probendicke = 70mm) und Referenzprobe .....	55
Abbildung 4-27 Drahtgitterkorb als Probenhalter zur Prüfung der Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 (ABM 1999) .....	56
Abbildung 4-28 Glasröhre mit Proben und angeschlossenem Glaskolben mit gesättigter Salzlösung (SCHOLZ 2000) .....	58
Abbildung 4-29 Prinzipskizze zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes mittels Prüfgefäßverfahren und relevante Abmessungen der verwendeten runden Prüfgefäße; Links: Prüfbedingung A; Rechts: in Anlehnung an Prüfbedingung C .....	60



Abbildung 4-30 Prinzipskizze des Gleichstromverfahrens zur Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstands nach DIN EN 29053.....	61
Abbildung 4-31 Links: Krafteinleitung mit dem Kreistrüttler, Rechts: Krafteinleitung mit dem Druckluftzylinder .....	63
Abbildung 4-32 Übertragungsfunktion des Rütteltisches bei Anregung mit 49 Hz (Abbildung zeigt vertikale Messung, horizontal entsprechend).....	64
Abbildung 4-33 Übertragungsfunktion des Rütteltisches bei Anregung mit 49 Hz im belasteten Zustand (Prüfzylinder befüllt mit Altpapierflocken 09).....	65
Abbildung 4-34 Frequenzspektrum bei oszillierendem Druckluftzylinder und 4,0 bar Druck.....	67
Abbildung 4-35 Frequenzspektrum bei oszillierendem Druckluftzylinder und 6,0 bar Druck.....	68
Abbildung 4-36 Prinzipskizze des Kleinprufstandes zur Ermittlung der Volumenstabilität loser Dämmstoffe .....	69
Abbildung 4-37 Frequenzspektrum: Bandsägespan (Streudichte 236,1 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ), Einstreuhöhe 250 mm (mit Ausgleichsfach) .....	70
Abbildung 4-38 Frequenzspektrum: FES (Streudichte: 13,7 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ), Einstreuhöhe 250 mm (mit Ausgleichsfach) .....	70
Abbildung 4-39 Realisierte Messanordnung zur Untersuchung des Kompressionsverhaltens; A: verfahrbare Traverse, B: Probenhalter; C: Pressstempel, D: Kraftmessdose, E: Messverstärker	73
Abbildung 4-40 Prinzip der Krafteinleitung am Rütteltisch mit aufgespanntem Gefach.....	74
Abbildung 4-41 Schwingungscharakteristik mit ausgeprägten Überlagerungen im Bereich zwischen 65 Hz und 80 Hz.....	75
Abbildung 4-42 Schwingungscharakteristik mit geringen Überlagerungen im Bereich von 70 Hz .....	76
Abbildung 4-43 Links: Prüfaufbau zur Durchführung der Fallversuche mit eingespanntem Gefach (A), Führungsschienen (B) und Auslösevorrichtung (C); Rechts: Detail zur Führung durch Metallwinkel und Rollenkonstruktion .....	77
Abbildung 4-44 Prüffeld zur Ermittlung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393 .....	79
Abbildung 4-45 Prinzipskizze des Messaufbaus zur Ermittlung der Übertragung von Schwingungen in die Materialschicht.....	81
Abbildung 4-46 Prinzipskizze des Temperaturdifferenzprufstandes, bestehend aus SB11 Klimaschrank, Einsatz zur Aufnahme der Kästen mit dem Prüfgut und davor angebrachtem Trockenschrank .....	84
Abbildung 5-1 Gegenüberstellung von Setzungsdichte als Absolutwert [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ] (linke Achse, breitere Säulen im Hintergrund) und prozentualer Setzung, bezogen auf die Startdichte [%] (rechte Achse, schlanke Säulen im Vordergrund) .....	89
Abbildung 5-2 Korrelation zwischen Streudichte und Dichte nach Belastung durch das Auflagergewicht (1340 g) sowie Streudichte und Setzungsdichte (alle Materialien) .....	90
Abbildung 5-3 Wärmeleitfähigkeit der geprüften Hobelspanmaterialien in Abhängigkeit der Einbringdichte.....	91
Abbildung 5-4 Wärmeleitfähigkeitswerte der geprüften Faserstoffe in Abhängigkeit der Einbringdichte .....	92
Abbildung 5-5 Wärmeleitfähigkeitswerte der sonstigen geprüften Materialien in Abhängigkeit der Einbringdichte.....	93
Abbildung 5-6 Links: Sechseckige Mischertrommel mit eingebauten Leitblechen; Rechts: Einbau zur Drucklufteinblasung über die Mischerecke.....	95
Abbildung 5-7 Mischgüteverlauf – Darstellung der geschätzten empirischen Streuung s <sub>k</sub> <sup>2</sup> über der Mischzeit, bezogen auf eine Probengröße von 1dm <sup>3</sup> .....	96

Abbildung 5-8 Mischgüteverlauf – Darstellung der Differenz $\bar{c}_K - c_{Gg}$ über der Mischzeit, bezogen auf eine Probengröße von $1 \text{ dm}^3$ .....	97
Abbildung 5-9 Hohlräume innerhalb der Matrix des FES durch agglomerierten Faserstoff .....	99
Abbildung 5-10 Mischertrommel mit Mischleitblechen (Länge = 50 cm, Höhe = 15 cm).....	103
Abbildung 5-11 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ der Einzelmaterialien und zugehörige Regressionspolynome $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ( $\rho$ ) entsprechend Tabelle 5-13.....	107
Abbildung 5-12 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Fichte Hobelspan H02 .....	109
Abbildung 5-13 Isolinien aus $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho$ ) für die Mischungen mit Fichte Hobelspan H02 projiziert auf die Ebene [ $\rho$ ;MV] .....	109
Abbildung 5-14 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Faserstoff H08 .....	110
Abbildung 5-15 Isolinien aus $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho$ ) für die Mischungen mit Faserstoff H08 projiziert auf die Ebene [ $\rho$ ;MV].....	110
Abbildung 5-16 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Altpapierflocken H09 .....	111
Abbildung 5-17 Isolinien aus $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] (MV [%]; $\rho$ [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]) für die Mischungen mit Altpapierflocken H09 projiziert auf die Ebene [ $\rho$ ;MV].....	111
Abbildung 5-18 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ (MV; $\rho = \text{konst.}$ ) für $\rho = 60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ; Mischungen: H01 und H08; H01 und H09	112
Abbildung 5-19 $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ der dreikomponentigen Mischungen und Regressionspolynome $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ ( $\rho$ ) der Einzelmaterialien und dreikomponentiger Mischungen.....	113
Abbildung 5-20 Temperaturverhalten der Dämmschicht; Materialvariante C09; Einbringdichte: $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ (oben) und $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ (unten) .....	114
Abbildung 5-21 Temperaturverhalten: Messebene **/1 und **/8 der Materialvarianten H09 und D09; Oben: $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ Unten: $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ .....	115
Abbildung 5-22 Definition des Temperaturamplitudenverhältnisses (TAV) und der Phasenverschiebung $\phi$ .....	116
Abbildung 5-23 logarithmisch skaliertes Strömungswiderstand $r$ [ $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ] in Abhängigkeit von der Einbringdichte für die Materialvarianten H01, H08, H09, A08, C08, D08, A09, C09 und D09 ...	118
Abbildung 5-24 Zusammenhang zwischen Dichte, Strömungswiderstand und Wärmeleitfähigkeit der Materialien FES H01 (schwarze Datenpunkte), Faserstoff H08 (blaue Datenpunkte) und Altpapierflocken H09 (rote Datenpunkte) .....	120
Abbildung 5-25 Dichtestufen entsprechend den Versuchsschritten; Materialien: H01, H02, H08, H09; Klimatisierung: 23/50 .....	121
Abbildung 5-26 Zusammenhang zwischen der Startdichte (logarithmisch aufgetragen) und der Dichte nach unterschiedlichen Versuchsschritten für die geprüften Materialvarianten (Daten siehe: Anhang 7 - Anhang 9) .....	122
Abbildung 5-27 Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A02, B02, C02, D02 und H02 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (Raumkl.): $R^2 = 0,90$ .....	124
Abbildung 5-28 Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A08, B08, C08, D08 und H08 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (23/50): $R^2 = 0,97$ ; RGP (Raumkl.): $R^2 = 0,94$ .....	124
Abbildung 5-29 Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A09, B09, C09, D09 und H09 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (23/50): $R^2 = 0,99$ ; RGP (Raumkl.): $R^2 = 0,97$ .....	125
Abbildung 5-30 graphische Herleitung des $MV_{\Delta p\text{Max}}$ .....	126
Abbildung 5-31 Regressionspolynome RGP 08 (23/50) mit dem Verlauf der partiellen Dichten der beteiligten Kompositpartner A (FES H01) und B (Faserstoff H08); Ordinate gilt für: Setzungsdichte Komposit, partielle Setzungsdichte A + B, Streudichte H01.....	128

Abbildung 5-32 Regressionspolynome RGP 09 (23/50) mit dem Verlauf der partiellen Dichten der beteiligten Kompositpartner A (FES H01) und B (Altpapierflocken H09); Ordinate gilt für: Setzungsdichte Komposit, partielle Setzungsdichte A + B, Streudichte H01.....	129
Abbildung 5-33 Links: Modell zur Einbettung der FES in die Materialmatrix der Komponente Faserstoff H08 (dunkle Bereiche sind Agglomerate); Rechts: Altpapierflocken H09 mit homogener Verteilung der FES in einer lockeren Materialstruktur.....	130
Abbildung 5-34 Mittelwerte der Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]; Setzungsdichte, bezogen auf die Streudichte [%]; Rückstellichte, bezogen auf die Setzungsdichte [%]; (Anhang 7, Anhang 9).	130
Abbildung 5-35 Streudichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Mischungen mit Fichte Hobelspan 02 (RGP 02 Streu KV (Raumkl.)), Faserstoff H08 (RGP 08 Streu KV (23/50)) und Altpapierflocken H09 (RGP 09 Streu KV (23/50)) .....	131
Abbildung 5-36 Verlauf der maximalen Beschleunigungsamplituden aus der Frequenzanalyse des Zeitsignals der Beschleunigung für die konstante Vibration (Versuchsschritt 4 - Tabelle 4-9) aufgenommen alle 30 s .....	133
Abbildung 5-37 Verlauf der Frequenz der maximalen Beschleunigung aus Abbildung 5-36 aufgetragen über der Versuchslaufzeit für die Vibration mit konstanter Anregung von 73 Hz.....	133
Abbildung 5-38 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch D09-KG-19-01-1 (konstante Vibration) .....	134
Abbildung 5-39 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch A09-KG-32-01-1 (konstante Vibration) .....	135
Abbildung 5-40 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch A09-KG-32-04-1 (konstante Vibration) .....	136
Abbildung 5-41 Übertragungsfunktion der jeweils ersten Messung (schwarze Linie) und letzten Messung (rote Linie) aus den Versuchen A09-KG-32-01-1 (linke Abbildung) und A09-KG-32-04-1 (rechte Abbildung) .....	136
Abbildung 5-42 Maximale Beschleunigungsamplituden aus der Frequenzanalyse des Zeitsignals der Beschleunigung für die Vibration aus den Frequenzrampen (Versuchsschritte 6 + 18 - Tabelle 4-9), aufgenommen jeweils 15 s nach Frequenzwechsel (interpolierte Linien zur Verbesserung der Lesbarkeit).....	138
Abbildung 5-43 Frequenz der maximalen Beschleunigung aus Abbildung 5-42 (Schwingfrequenz) aufgetragen über der Anregungsfrequenz der Frequenzrampe.....	138
Abbildung 5-44 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuchsschritt A09-KG-32-01-2 (1. Vibrationshochlauf).....	139
Abbildung 5-45 Übertragungsfunktion der letzten vier Beschleunigungsmessungen aus dem Versuch A09-KG-32-01-2 .....	140
Abbildung 5-46 prozentuale Erhöhung (kumulierte Darstellung) der Dichte während der Bauteilversuche, sortiert nach Mischungsansätzen (A**, C**, D**, E**, F**) .....	143
Abbildung 5-47 Dichteprofil; 0 % Höhe = Gefachboden; 100 % Höhe = Setzungshöhe .....	145
Abbildung 5-48 homogenes Dichteprofil (RGP Nr. XII) und Dichtegefälle (RGP Nr. XI) über der Materialtiefe .....	147
Abbildung 5-49 Schweredruck der Materialsäule [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] aufgetragen über der Materialtiefe.....	148
Abbildung 5-50 mittlere Dichte im unteren Drittel ( $\rho_{\text{DuD}}^{**}$ ) der geprüften Mischungen mit Altpapierflocken im Vergleich mit der volumenstabilen Dichte, ermittelt auf dem Kleinprüfstand .....	149
Abbildung 5-51 Dichteprofile entsprechend den Funktionen in Tabelle 5-31 .....	150
Abbildung 5-52 Flächengewicht, entsprechend den Funktionen in Tabelle 5-31 .....	151

Abbildung 5-53 Differenz des Flächengewichts zwischen homogenem und linearem Dichteprofil, entsprechend Abbildung 5-51.....	151
Abbildung 5-54 Setzungsdichte auf dem Kleinprüfstand (RGP 08) in Gegenüberstellung zu den Bauteilversuchen ( $\rho_{\text{Setz}}$ ); Streudichte im Bauteil; Mischungen mit Faserstoff H08 und FES H01152	
Abbildung 5-55 Setzungsdichte auf dem Kleinprüfstand (RGP 09) in Gegenüberstellung zu den Bauteilversuchen ( $\rho_{\text{Setz}}$ ); Streudichte im Bauteil; Mischungen mit Altpapierflocken H09 und FES H01 .....	152
Abbildung 5-56 Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule [VF] für die Einzelmaterialien H01, H02, H08 sowie die Mischungen A08, C08, D08, E08 und F08 .....	155
Abbildung 5-57 Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule [VF] für die Einzelmaterialien H01 und H09 sowie die Mischungen A09, C09 und D09.....	155
Abbildung 5-58 Fouriertransformiertes Beschleunigungssignal aufgetragen über der Frequenz für jeweils 2 unterschiedliche Schwingungsbelastungen des Prüfzylinders und die im Material gemessene Schwingung; jeweils ermittelt bei einem $VF = 1,25$ .....	156
Abbildung 5-59 Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen in die Materialschicht; die Bezeichnung der Datenreihe repräsentiert die Material / Mischungskennziffer und nachgestellt den Verdichtungsfaktor der jeweiligen Messreihe; zusätzlich aufgetragen ist die Winkelhalbierende .....	159
Abbildung 5-60 3D Flächenapproximationen für den Zusammenhang $a_{\text{innen}} = f(VF; a_{\text{außen}})$ .....	160
Abbildung 5-61 partielle Funktion $a_{\text{innen}} = f(VF; a_{\text{außen}} = 1,5)$ für die Materialvarianten H09, A09, C09, D09 und H01 entsprechend dem Ansatz nach Gleichung 6 mit den Koeffizienten nach Tabelle 5-34.....	161
Abbildung 5-62 3D Flächenapproximationen für den Zusammenhang $a_{\text{innen}} = f(VF; MV)$ mit Projektion der Isolinien .....	162
Abbildung 5-63: Isolinien $a_{\text{innen}} = \text{konst.}$ für $a_{\text{innen}} = 0,1 - 2,0$ g aus dem Zusammenhang $a_{\text{innen}} = f(VF; MV)$ für eine Anregung des Prüfzylinders mit $a_{\text{außen}} = 1,5$ g projiziert auf die Ebene $MV$ [%], $VF$ [-] .....	162
Abbildung 5-64 Beschleunigung $a_{\text{außen}}$ und $a_{\text{innen}}$ für die Varianten A09 und D09 bei unterschiedlichen Materialfeuchten .....	163
Abbildung 5-65 Sorptionsisothermen (Modellierung nach NELSON 1983) und Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H01 und H02.....	165
Abbildung 5-66 Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H08 und H08i.....	165
Abbildung 5-67 Sorptionsisothermen (Modellierung nach NELSON 1983) und Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H09 und H09i.....	166
Abbildung 5-68 Funktion: $\mu = f(MV, \rho)$ für die Mischungen mit Faserstoff H08 .....	168
Abbildung 5-69 Isolinien aus $\mu = f(MV, \rho)$ für die Mischungen mit Faserstoff H08 projiziert auf die Ebene $[\rho; MV]$ .....	169
Abbildung 5-70 Isolinien aus $\mu = f(MV, \rho)$ für die Mischungen mit Altpapierflocken H09 projiziert auf die Ebene $[\rho; MV]$ .....	169
Abbildung 5-71 Mittelwerte der untersuchten Kriterien: Entzündung [s], Ende Nachbrennzeit [s], max. Flammenhöhe [cm] der untersuchten Mischungen A09i, C09i und D09i im untersuchten Dichtebereich.....	172
Abbildung 5-72 Probenkörper nach 28 Tagen Inkubationszeit; Variante I (oben): deutlicher Bewuchs, Variante II (unten): kein Bewuchs feststellbar .....	174
Abbildung 5-73 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Myzel und Konidienträger von <i>Penicillium</i> sp. (25-fach vergrößert).....	175

---

Abbildung 5-74 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Fruchtkörper Ascomata von <i>Chaetomium globosum</i> (50-fach vergrößert) .....	175
Abbildung 5-75 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Ascomata von <i>Chaetomium globosum</i> (7,5-fach vergrößert) .....	175
Abbildung 5-76 Variante II; Frässpäne und Altpapierfasern ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert) ....	176
Abbildung 5-77 Variante III; Altpapierfasern ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert) .....	176
Abbildung 5-78 (Variante III; Frässpan ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert) .....	176
Abbildung 6-1 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und volumenstabiler Dichte für Mischungen aus FES H01 und Altpapierflocken H09 .....	180

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Mögliche Einteilung von Dämmstoffen in Abhängigkeit von Materialgruppe und Aufbereitung (in Anlehnung an ANONYMUS 2002).....	28
Tabelle 4-1 Streudichten der Einzelmaterialien in 20/65.....	41
Tabelle 4-2 Werkzeug- und Verfahrensparameter zur Herstellung des Materials FES H01 .....	44
Tabelle 4-3 Streudichten der Einzelmaterialien der Hauptversuche bei 20/65 .....	45
Tabelle 4-4 Einstreubedingungen zur Ermittlung der Streudichte.....	54
Tabelle 4-5 Verwendete Salze und zugehörige r. F. über der gesättigten Lösung bei 20°C (nach SCHNEIDER 1960) .....	58
Tabelle 4-6 Prüfbedingungen und verwendete Prüfpilze zur Bestimmung der Schimmelpilzbeständigkeit in Anlehnung an DIN EN 60068.....	62
Tabelle 4-7 Variationskoeffizienten des Dichtegefälles in Abhängigkeit unterschiedlicher Auflagermassen (Material: Altpapierflocken 09; Einstreuhöhe 500 mm, Kreisrüttler).....	66
Tabelle 4-8 Gemittelte Schichtdichten des oberen, mittleren und unteren Drittels nach der Verdichtung bei unterschiedlichen Einstreuhöhen im Startzustand (Material: Altpapierflocken 09, Auflagergewicht 500 g, je Einstreuhöhe drei Versuche, Kreisrüttler).....	66
Tabelle 4-9 Versuchsablauf zur Prüfung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393.....	78
Tabelle 4-10 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofil zur Ermittlung des Temperaturverhaltens der Dämmschicht (Gesamtlaufzeit: 148 h) .....	85
Tabelle 5-1 Ergebnisse der Prüfung zur Volumenstabilität der Einzelmaterialien auf dem Kleinprüfstand.....	87
Tabelle 5-2 Auswahl der Mischungspartner .....	94
Tabelle 5-3 Mischerabmaße und Befüllgrad (Material- und Methodenscreening) .....	95
Tabelle 5-4 Ergebnisse der Prüfung zur Volumenstabilität der Mischungen der Vorversuche auf dem Kleinprüfstand.....	98
Tabelle 5-5 Anteil der Komponente FES 01 an der Streudichte der untersuchten Mischungen .....	99
Tabelle 5-6 Anteil der Komponente FES 01 an der Setzungsdichte der untersuchten Mischungen ...	99
Tabelle 5-7 Bildung ungefüllter Hohlräume durch eine niedrigere partielle Dichte des FES .....	100
Tabelle 5-8 Ausgleichsfeuchten der Einzelmaterialien bei 23/50 und 20/65 .....	100
Tabelle 5-9 Bewertungsmatrix zu ausgewählten Eigenschaften des durchgeführten Materialscreenings .....	102
Tabelle 5-10 Maße der Mischertrommel und Drehzahl (Hauptversuche) .....	103
Tabelle 5-11 Mischgütebestimmung unterschiedlicher Mischungen direkt nach dem Mischprozess.	105
Tabelle 5-12 Mischgütebestimmung über der Mischerlaufzeit nach 60 s, 120 s und 180 s .....	106
Tabelle 5-13 Regressionsparameter für den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte.....	106
Tabelle 5-14 Koeffizienten zu den Flächenapproximationen aus Abbildung 5-12, Abbildung 5-14 und Abbildung 5-16 .....	108
Tabelle 5-15 TAV [-], $\phi$ [h] und $\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)] in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis [%] und der Einbringdichte .....	116
Tabelle 5-16 spezifische Wärmekapazität, Temperaturleitzahl, Wärmeeindringkoeffizient der geprüften Materialvarianten in unterschiedlichen Dichtestufen.....	117
Tabelle 5-17 Regressionsparameter für den Zusammenhang Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Einbringdichte .....	119

Tabelle 5-18 Korrelationskoeffizienten R [-] für den Zusammenhang zwischen den gemittelten Dichten nach unterschiedlichen Versuchsschritten für die geprüften Materialvarianten entsprechend Anhang 7 - Anhang 9.....	123
Tabelle 5-19 Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regressionspolynome und die 1. Ableitung für den Zusammenhang Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über MV [%].....	123
Tabelle 5-20 Lineare Interpolation (i – iii) und daraus abgeleitetes $MV_1$ und $\Delta$ Setzungsdichte .....	126
Tabelle 5-21 Koeffizienten der Regressionspolynome zu den partiellen Dichten der Komponenten A und B im Komposit .....	127
Tabelle 5-22 Regressionspolynome für den Zusammenhang Startdichte in Abhängigkeit des Mischungsverhältnis .....	131
Tabelle 5-23 Setzungsdichte nach Versuchen mit unterschiedlichem Schwingungsverhalten .....	137
Tabelle 5-24 Histogramm der maximalen Beschleunigungen der Vibrationsbeanspruchung aus der Frequenzrampe (alle Versuche) zwischen 70 Hz und 73 Hz Anregungsfrequenz .....	139
Tabelle 5-25 Histogramm der Beschleunigungen aus den Fallversuchen, Versuchsschritt 10 + 12; Tabelle 4-9.....	141
Tabelle 5-26 Setzungsdichte und gemessene Maximalbeschleunigungen der Fallversuche für die Versuche A09-KG-32-01 und A09-KG-32-05.....	141
Tabelle 5-27 Mischungsverhältnis (Anteil H01), relative Dichteerhöhung und Differenz der Dichte zwischen oberem und unterem Drittel (Oben – Unten).....	144
Tabelle 5-28 Korrelationen zwischen: Anteil FES H01, relativer Dichteerhöhung durch den Versuch, Differenz der Dichte zwischen oberem und unterem Drittel (für Versuche mit Startdichte = Streudichte) .....	146
Tabelle 5-29 Regressionsparameter RGP A09-32 lineares Dichteprofil und am Mittelwert gespiegelte Funktion sowie Konstante für die Funktion homogenes Dichteprofil .....	147
Tabelle 5-30 Integrale der Funktionen aus Tabelle 5-29 .....	148
Tabelle 5-31 Funktionen und Integrale zu Dichteprofilen.....	150
Tabelle 5-32 Regressionspolynome für den Zusammenhang Startdichte ( $\rho_{\text{Start}}$ ) in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses (MV).....	153
Tabelle 5-33 Regressionspolynome für den Zusammenhang Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule (VF), sowie die mittlere Materialfeuchte nach Versuchsdurchführung .....	154
Tabelle 5-34 Koeffizienten der in Abbildung 5-60 dargestellten 3D-Flächenapproximationen gemäß Gleichung 6.....	160
Tabelle 5-35 Koeffizienten der in Abbildung 5-62 dargestellten 3D-Flächenapproximation zum Ansatz nach Gleichung 6.....	161
Tabelle 5-36 Materialfeuchten der durchgeführten Sorptionsmessungen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten und 20°C.....	164
Tabelle 5-37 Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl; Prüfgefäß trocken .....	167
Tabelle 5-38 Koeffizienten zu den Flächenapproximationen aus Abbildung 5-68, Abbildung 5-69 und Abbildung 5-70 gemäß Gleichung 7.....	168
Tabelle 5-39 Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl; Prüfgefäß nass .....	170
Tabelle 5-40 Ergebnisse der Prüfung des Brandverhalten (B2-Prüfung) .....	171
Tabelle 5-41 Varianten zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit.....	173
Tabelle 5-42 Ergebnis der Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit (PLASCHKIES 2009).....	173

## Einheiten, Formelzeichen und Abkürzungen

s	Sekunde
g	Gramm
W	Watt
k	Kilo
m	Meter
mm	Millimeter
$\mu\text{m}$	Mikrometer
w	Siebmaschenweite [ $\mu\text{m}$ ]
K	Kelvin [ $^{\circ}\text{K}$ ]
T	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
t	Zeit
a	Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]
$a_{\text{au\ss en}}$	Beschleunigung gemessen am Prüfgefach [ $\text{m/s}^2$ ]
$a_{\text{innen}}$	Beschleunigung gemessen im Material [ $\text{m/s}^2$ ]
$\hat{a}$	Maximale Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]
y	Elongation [m]
$\hat{y}$	Maximale Elongation [m]
A	Amplitude = Schwingungsweg (entspricht der zweifachen maximalen Elongation)
g	Erdbeschleunigung [ $9,81 \text{ m/s}^2$ ]
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit [1/s]
f	Frequenz [1/s]
$f_A$	Anregungsfrequenz [1/s]
$f_S$	Schwingfrequenz [1/s]
kg	Kilogramm
atro	absolut trocken (0% Materialfeuchte)
Hz	Hertz [1/s]
r. F.	relative Luftfeuchte [%]
et al.	und andere
u.a.	unter anderem
lim ( )	Grenzwert
$\infty$	unendlich
$\rightarrow$	geht gegen
xiv	



$\alpha$	Signifikanzniveau
$\rho$	Dichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{Setz}}$	Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{DuD}}$	Dichte im unteren Drittel des Gefachs nach Versuchsende [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{Streu}}$	Streudichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{Start}}$	Startdichte (bei Versuchsbeginn) [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{bel}}$	Dichte nach Belastung mit statischer Auflagerlast [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{Rück}}$	Rücksteldichte nach Vibrationsbelastung ohne Auflagergewicht [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
$\rho_{\text{part}}$	Partielle Dichte einer Komponente in der Mischung [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
DG	Dichtegefälle: im Gefach von oben nach unten zunehmende Dichte
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$	Wärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von $10^\circ\text{C}$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	Minimale Wärmeleitfähigkeit innerhalb eines Rohdichtebereiches bei einer Probenmitteltemperatur von $10^\circ\text{C}$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
$\lambda_{\text{Holz}\perp}$	Wärmeleitfähigkeit des Holzes quer zur Faser [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
$\lambda_{\text{Holz}\parallel}$	Wärmeleitfähigkeit des Holzes längs zur Faser [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
VF	Verdichtungsfaktor = $\text{Dichte}_{\text{atro}} / \text{Streudichte}_{\text{atro}}$
MV	Mischungsverhältnis = Anteil FES [%]
R	Korrelationskoeffizient
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
a	Temperaturleitfähigkeit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
b	Wärmeeindringkoeffizient [ $\text{kW}\cdot\text{s}^{0,5}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
c	spezifische Wärmekapazität [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
d	Materialtiefe ( $d = 0 =$ Oberste Materialschicht)
$\rho_{\text{Schw}}$	Schweredruck [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]
r	längenbezogener Strömungswiderstand [ $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ]
W	Wertebereich
f( )	Funktion (von)
F	Kraft [N]
$c_{\text{W}}$	spezifische Wärmekapazität von Wasser [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$c_{\text{H0}}$	spezifische Wärmekapazität von absolut trockenem Holz [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
$c_{\text{Hu}}$	spezifische Wärmekapazität von feuchtem Holz [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
u	Materialfeuchte [%]
$c_{\text{K}}$	Konzentration der Komponente A in der Analysenprobe

$\bar{c}_K$	mittlere Konzentration der Komponente A in der Probenmenge
$\bar{c}_{Gg}$	mittlere Konzentration der Komponente A in der Grundgesamtheit
$s_K^2$	geschätzte empirische Streuung
RGP	Regressionsfunktion eines polynomischen Trends
RKP	Regressionsfunktion eines exponentiellen Trends
konst.	Konstant
n	Anzahl
$\bar{x}$	Mittelwert
s	Standardabweichung
V	Variationskoeffizient [%]
MIN	Minimum
MAX	Maximum
FES	Federelastisches Spangut, Federelastische Späne
TMP	thermomechanical pulp, thermomechanisch aufgeschlossener Faserstoff
23/50	23°C / 50 % r. F.
20/65	20°C / 65 % r. F.
40/95	40°C / 95 % r. F.
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
$\bar{\delta}_a$	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft [kg/(m*s*Pa)]
$\bar{\delta}_b$	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des Stoffes [kg/(m*s*Pa)]
$s_d$	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
W	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, bezogen auf den Dampfteildruck [kg/(m <sup>2</sup> *s*Pa)]
$W_c$	korrigierter Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, bezogen auf den Dampfteildruck [kg/(m <sup>2</sup> *s*Pa)]
$Z_m$	Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand der Membran, bezogen auf den Dampfteildruck [(m <sup>2</sup> *s*Pa)/kg]
$Z_t$	Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand der Membran und der Probe, bezogen auf den Dampfteildruck [(m <sup>2</sup> *s*Pa)/kg]
$Z_s$	Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand der Probe, bezogen auf den Dampfteildruck [(m <sup>2</sup> *s*Pa)/kg]

# 1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation baut auf einer Reihe von Voruntersuchungen auf (u. a. VOGEL 1999; VOGEL et al. 2002; WEGENER et al. 2004), die sich mit der prinzipiellen Eignung von ungebundenen Holzpartikeln und lignocellulosehaltigen Faserstoffen als Dämmstoff beschäftigt haben.

## 1.1 Aufgaben des baulichen Wärmeschutzes

Häuser und Wohnungen dienen den Menschen seit jeher als Schutz vor Niederschlag, Kälte, Hitze, Tieren und Feinden. Das in planerischer Hinsicht vorherrschende Kriterium bei Entwurf und Ausführung von Bauwerken und Gebäuden war jedoch über Jahrhunderte hinweg fast einzig die Standsicherheit der Konstruktion. Der Wärmeschutz und die Bauphysik im Allgemeinen waren nachgeordnet und haben erst seit Mitte der Fünfzigerjahre des letzten Jahrhunderts zunehmende Bedeutung erlangt. Lag die Motivation der im Jahr 1952 eingeführten DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau noch vornehmlich darin, ein wohngygienisch einwandfreies Raumklima zu schaffen, um einen sogenannten Mindestschutz der Bewohner zu garantieren, so ist spätestens seit der ersten großen Ölkrise im Jahr 1973 auch die voranschreitende Energieverteuerung als Ansporn neuer Entwicklungen im bauphysikalisch konstruktiven Bereich zu sehen (u. a. KÜNZEL 1989, LINDEMANN 1994, WILLEMS et al. 2006). Diese Entwicklung hat in den letzten Jahren weiter an Brisanz gewonnen, da die starken Preissteigerungen für Energieträger auf Erdölbasis, in Verbindung mit gezielten Lenkungsabgaben des Staates, die finanzielle Belastung für die Bevölkerung deutlich erhöht haben – so ist das Thema Wärmedämmung und die Bereitstellung von ganzheitlichen Energiesparkonzepten inzwischen zu einem wichtigen Verkaufsargument, z. B. bei der Vermarktung von Fertighäusern, geworden (ANONYMUS 2006a).

Einleitend sollen an ausgewählten Beispielen einige der Aufgaben und Leistungen, die ein adäquater Wärmeschutz bei der Neuplanung und Renovierung von Wohn- und Nutzgebäuden aufbringen muss, dargelegt werden.

### 1.1.1 Wohnhygienische Verhältnisse

Stellt man die Frage nach den Aufgaben des baulichen Wärmeschutzes bei Wohngebäuden, so wird von den Bewohnern zunächst die Forderung nach einem behaglichen Wohnklima genannt – zumeist noch vor den rein gesundheitlichen, also wohngygienischen Aspekten, die zwar ebenso wichtig sind, aber oft nicht ursächlich mit Wärmeschutz in Verbindung gebracht werden.

Die thermische Behaglichkeit eines Raumes ist von einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren bestimmt, die sich je nach persönlichem Empfinden, Aktivität, Bekleidung, Alter, Gesundheitszustand und Gewöhnung unterschiedlich auswirken. Die wichtigste Größe ist hierbei die sogenannte Empfindungstemperatur. Sie wird definiert als der Mittelwert aus Raumlufttemperatur und der mittleren inneren Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen. Neben der absoluten Höhe der Empfindungstemperatur spielt aber vor allem auch der Abstand zwischen Raumluft- und Oberflächentemperatur der Wände eine entscheidende Rolle, sodass durch eine Verringerung der Differenz beider Werte die Raumluftinnentemperatur bei gleichem Behaglichkeitsempfinden abgesenkt werden kann. Eine angepasste Dämmung und optimierter Wärmeschutz an Wänden und Fenstern kann also nicht nur durch die Minimierung der Wärmeverluste über die Außenhaut des Gebäudes, sondern vor allem auch durch eine passive Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperaturen und der damit verbundenen Möglichkeit einer Absenkung der Raumlufttemperatur ohne Beeinflussung der thermischen Behaglichkeit des Wohnraumes zur Energieeinsparung beitragen (SEUNIG 2004b).

Neben der Frage der thermischen Behaglichkeit ist aber die Schaffung von wohnhygienisch einwandfreien Verhältnissen für den Nutzer der wohl wichtigste Aspekt baulichen Wärmeschutzes. Unzureichender oder falsch ausgelegter Wärmeschutz kann beispielsweise die Ursache für eine Belastung durch Schimmelpilzsporen sein. Hauptvoraussetzung für das Wachstum von in der Luft allgegenwärtigen Schimmelpilzsporen ist in jedem Fall eine ausreichende Feuchtigkeit (65 % – 70 % r. F.) und die Existenz entsprechender leichtverwertbarer Nährstoffe wie Zucker, Eiweiße und Fette. Die erste Antwort auf die Notwendigkeit von Energieeinsparung an Gebäuden im Bestand war in der Vergangenheit oft der Einbau dichter Fenster. In Altbauten mit entsprechend schlecht gedämmten Wänden kann diese Maßnahme jedoch zu einer Auffeuchtung der Wandflächen durch Kondensation der Luftfeuchtigkeit an den kalten Innenseiten der Außenwände führen, wenn die Bewohner ihr Lüftungsverhalten nicht an die neue Situation anpassen. Eine ausreichende Aufwärmung des Mauerwerkes durch die warme Raumluft ist dabei vor allem in Ecken oder hinter Möbeln, die an Außenwänden stehen, nicht möglich, was in Verbindung mit erhöhten Staubablagerungen oder bestimmten Wandfarben und Tapetenkleistern, die eine entsprechende Nährstoffgrundlage bieten, zum Befall führt. Auch wenn Feuchteschäden durch unzureichendes Lüftungsverhalten nie ausgeschlossen werden können, kann eine entsprechende Wärmedämmung einen wichtigen Beitrag zu einer Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperaturen liefern und somit helfen, Wärmebrücken an Außenbauteilen zu vermeiden, was letztlich Schimmelpilzbildungen entgegenwirkt. (SEUNIG 2004a; WEIß et al. 2006)

### **1.1.2 Vermeidung von Feuchteschäden in der Konstruktion**

Neben der Herstellung eines behaglichen und wohnhygienisch einwandfreien Raumklimas trägt der bauliche Wärmeschutz auch dazu bei, die Baukonstruktion zu schützen, wobei es auch hier in erster Linie wieder um die Vermeidung von Feuchteschäden geht. Beeinträchtigungen der Bausubstanz durch Feuchteeinwirkung können optischer Natur sein. Hier sind Verschmutzungen, Algen, Pilze oder Salzausblühungen als typische Schadensbilder anzusehen. Daneben können auch mechanische Schäden wie Holzfäulnis, Frostschäden durch Sprengwirkung an Betonteilen oder Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung des Betons, u.ä. an der Konstruktion auftreten.

Ein Feuchteintrag kann dabei über Wasserdampfdiffusion vom warmen zum kalten Bereich, aber auch durch Schlagregen, aufdrückendes Grundwasser, Erdfeuchte, Sickerwasser oder Brauchwasser verursacht und durch Diffusion im Baustoff weitergeleitet werden. In nicht luftdichten Konstruktionen kann außerdem ein Feuchtetransport über Konvektion stattfinden. Bei Unterschreitung des Kondensationspunktes besteht die Gefahr der Durchfeuchtung des Bauelementes durch Taubildung. Durch diffusionsoffenes Bauen mit einem von innen nach außen abnehmendem Diffusionswiderstand wird ein hohes Rücktrochnungsvermögen erreicht, und durch entsprechend ausgelegte Wärmedämmmaßnahmen kann sowohl der Entstehung von Kondensat als auch der weiteren Schadensausbreitung, beispielsweise durch Auffrieren im Bauteil eingeschlossenen Wassers, wirkungsvoll entgegengetreten werden. (KRUS 2005)

### **1.1.3 Energieeinsparung durch Wärmedämmmaßnahmen**

Auch wenn die Probleme zunehmender Ressourcenknappheit oft kontrovers diskutiert werden und in der breiten Bevölkerung noch immer nicht durchgängig als entscheidendes Zukunftsproblem erkannt worden sind, was wohl auch an einer Reihe nicht eingetretener Energiepreisprognosen der letzten Jahrzehnte liegt, ist die Endlichkeit fossiler Rohstoffe unbestritten und wird die Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten vor einschneidende Veränderungen stellen. Die klassischen Energieressourcen wie Stein- und Braunkohle, Erdöl und Naturgase, hatten in Deutschland im Jahr 2009 einen Anteil am Primärenergieverbrauch von ca. 78,8 %. Erneuerbare Energiequellen decken ca. 8,9 % des

Primärenergieverbrauchs ab. Der Rest wird von Kernenergie (11,0 %) und sonstigen Energiequellen (1,3 %) bereitgestellt (AGEB 2010a). Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch stieg in den Jahren von 1990 bis 2009 von 1,3 % auf 8,9 % an, wobei ab dem Jahr 2003 deutlich größere Steigerungsraten festgestellt werden können, was neben einer Erweiterung der Erfassungsmethodik in diesem Jahr vor allem auch auf die Förderung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz aus dem Jahr 2000 zurückzuführen ist (TZSCHEUTSCHLER et al. 2009, AGEB 2009). Untergliedert man die erneuerbaren Energieträger weiter, so fällt auf, dass die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch seit 2003 fast ausschließlich auf einer Steigerung des Anteils an Energie aus Biomasse beruht, während die Nutzung von Wind- und Wasserkraft nur leichte Zuwächse verzeichnet, bzw. stagniert (AGEB 2009).

Obwohl, wie gezeigt, der Anteil regenerativer Energiequellen am Gesamtenergieverbrauch in den letzten Jahren deutlich gestiegen ist, so ist eine flächendeckende Substitution endlicher Rohstoffe in absehbarer Zeit nicht zu verwirklichen, weshalb es als derzeit wohl wichtigstes Ziel angesehen werden kann, die Reichweite der aktuell noch vorhandenen Reserven möglichst zu verlängern, um weiteren Handlungsspielraum zu gewinnen, sich mit der Frage der zukünftigen Energieerzeugung auseinanderzusetzen. Ein Energienotstand ist gleichzeitig auch ein Umweltnotstand, dessen Behebung grundlegende Veränderungen in der Bauart, d. h. verstärkte Wärmedämmmaßnahmen und eine veränderte Heiztechnologie nötig macht (GERTIS 1991).

Die Nutzungsdauer von Gebäuden beträgt ca. 50 - 100 Jahre. Dies hat zur Folge, dass mit der Entscheidung für ein bestimmtes Baukonzept der auftretende Energieverbrauch auf lange Zeit festgelegt ist oder nur mit großem finanziellem und praktischem Aufwand zu verändern ist. Die Lücke zwischen dem energietechnisch aktuell erreichbaren Optimum und der tatsächlich ausgeführten Baupraxis ist dabei teilweise sehr groß. So wurde das sogenannte Niedrigenergiehaus, wie es seit der Energieeinsparverordnung (EnEv) von 2002 als Mindeststandard vorgeschrieben ist, in Forschungsvorhaben und Demoprojekten bereits vor ca. zwanzig Jahren verwirklicht. Es braucht zwar in jedem Fall eine gewisse Zeit, bis sich neue Entwicklungen als allgemein anerkannte Regeln der Technik etablieren. Bei einem Bauprodukt, das über mehrere Jahrzehnte hinweg genutzt wird und zudem während seiner Nutzungsdauer in erheblichem Maße die Folgekosten einer Immobilie beeinflusst, sollte man sich aber stets am besten verfügbaren Technikstandard orientieren. (ERHORN et al. 2001)

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland war in den Jahren nach 1950 in Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Entwicklung einem starken Anstieg unterworfen. Seit etwa 1990 stagniert der Verbrauch bei rund 500 Mio t SKE und zumindest in Deutschland ist der Energieverbrauch nicht mehr direkt mit der wirtschaftlichen Entwicklung verknüpft, was jedoch neben technologischen Aspekten auch an der Verlagerung energieintensiver Industrien ins Ausland liegen könnte. Seit dem Jahr 2006 ist tendenziell ein Rückgang im Energieverbrauch festzustellen, der aber wohl vor allem konjunkturell bedingt ist (AGEB 2010b, BMWI 2010).

Die eingesetzte Endenergie berechnet sich formal aus dem Primärenergieverbrauch abzüglich des Verbrauchs und der Verluste im Energiesektor und dem nichtenergetischen Verbrauch der stoffherstellenden Industrie. In den letzten 20 Jahren beträgt der Anteil der Endenergie am Primärenergieverbrauch in Deutschland relativ konstant ca. 64 %.

Die Entwicklung der Verteilung des Endenergieverbrauchs auf die Konsumentengruppen in Deutschland ist neben technologischen Fortschritten, der demographischen Entwicklung und gesellschaftlichen Veränderungen auch von klimatischen und wirtschaftlichen Einflüssen geprägt, weshalb in den jeweiligen Verbrauchersektoren unterschiedliche Entwicklungen zu verzeichnen sind.

Im Allgemeinen werden folgende Verbrauchersektoren unterschieden: Industrie, Haushalte, Verkehr, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD).

Betrachtet man den Endenergieverbrauch in Deutschland anteilig, so ist es in den letzten 45 Jahren zu deutlichen Verschiebungen gekommen. Es können folgende Trends ausgemacht werden: Der Anteil des Verbrauchs an Endenergie in der Industrie ging in Deutschland von 1960 bis 2003 um rund 48 % zurück, während prozentual der anteilige Verbrauch der privaten Haushalte um 41 % gestiegen ist. Um insgesamt 81 % hat seit 1960 anteilig auch der Verbrauch durch Verkehr zugenommen und der Energieverbrauch in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) stieg anteilig um rund 13 %. (GEIGER et al. 2005, BOHNENSCHÄFER et al. 2005).

Eine Aufstellung über die Verteilung der eingesetzten Endenergie auf die Verbrauchersektoren in Deutschland während der letzten 20 Jahre (Abbildung 1-1) zeigt, dass z.B. die großen Einsparungen in der Industrie Anfang der 1990er Jahre durch einen steigenden Verbrauch in den Sektoren Verkehr und Haushalte überkompensiert wurden (AGEB 2009).

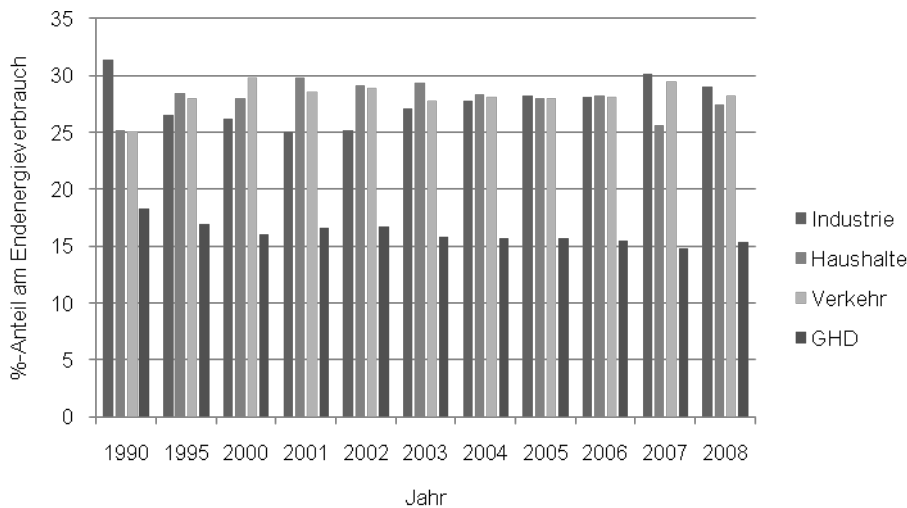


Abbildung 1-1 Verteilung des Endenergieverbrauchs auf Verbrauchersektoren in Deutschland von 1990 – 2008

Eine Aufschlüsselung des Energieverbrauchs auf die Anwendungsfelder im Jahr 2007 zeigt Abbildung 1-2. Neben der mechanischen Energie (Verkehr, Maschinenantriebe, etc.), die mit 41,6 % den größten Anteil einnimmt, dominiert mit 28,1 % die Prozeßwärme und der Raumheizbedarf, der mit 26,1 % nominell den drittgrößten Anteil in der Energiebilanz ausmacht. Spezifiziert man den Raumheizungsbedarf nun wieder auf die Verbrauchersektoren, so werden rund 69 % des Endenergiebedarfs zur Raumheizung in privaten Haushalten benötigt. Absolut sind dies also ca. 18 % des gesamten Endenergiebedarfs (TZSCHEUTSCHLER et al. 2009).

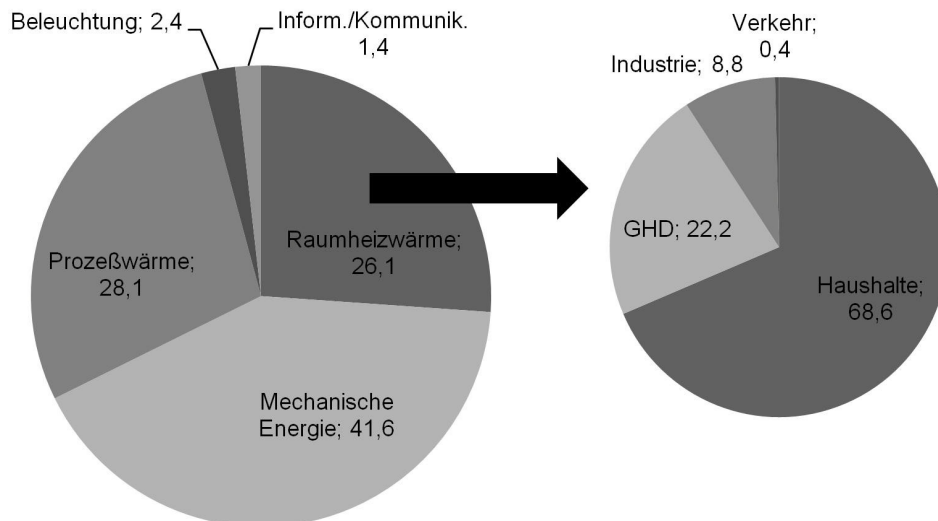


Abbildung 1-2 Links: Endenergieverbrauch [%] aufgeteilt auf Anwendungsfelder; Rechts: Raumheizwärmebedarf aufgeteilt auf die Verbrauchersektoren im Jahr 2007 (eigene Darstellung nach Tzscheutschler et al. 2009)

Die Energie zur Heizung von privaten Wohnräumen ist also bezüglich des Gesamtenergiebedarfes einer der bestimmenden Faktoren und gleichzeitig der Posten mit dem wohl größten Einsparpotential. In einer Prognose von EICKE-HENNIG 1997 wird ausgehend vom Jahr 1997 bei einer schrittweisen Umsetzung der Gebäudesanierung im Bestand bis 2050 ein Einsparpotential der Heizenergie von bis zu 50 % angenommen. BOHNENSCHÄFER et al. 2005 sehen in einer abschließenden Handlungsempfehlung für das Jahr 2003 im Sektor Raumheizung von Wohngebäuden ein Einsparpotential von rund 30 %. Unter der Voraussetzung einer konsequenten Umsetzung der EnEV, auch bei Altgebäuden im Bestand, sprechen andere Untersuchungen sogar von möglichen Energieeinsparungen bis zu 60 % (BUSCHMANN 2003).

Diese Werte übersteigen dabei die in einer Zukunftsstudie des Energiewirtschaftlichen Institutes der Universität Köln (ANONYMUS 2005) zum Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2030 getroffene Prognose einer bis zu diesem Zeitpunkt tatsächlich verwirklichten Einsparung von 17 % (bezogen auf die Werte im Jahr 1995). Diese Zahlen müssen natürlich auch immer vor dem steigenden Bedarf an Wohnfläche gesehen werden, der bis 2030 in Deutschland um ca. ein Drittel zunehmen wird.

Die in den Jahren von 2000 bis 2007 tatsächlich realisierten Einsparungen im Energieverbrauch der Haushalte sind in DESTATIS 2009 zusammengefasst. Demnach sind bei den Energieträgern deutliche Verschiebungen zu Gunsten der Brennholznutzung (einschl. Holzpellets) zu beobachten, und auch der tatsächliche Verbrauch an Raumwärme ist im Jahr 2007 um 16,0 % niedriger als im Jahr 2000, obwohl die Zahl an Haushalten und auch die absolut beanspruchte Wohnfläche gestiegen sind.

Ob diese Einsparungen, speziell im Bereich der Raumheizwärme, in Deutschland tatsächlich auf verbesserte Wärmedämmmaßnahmen und eine optimierte Heizungstechnologie zurückzuführen sind, oder teilweise auch dem im Vergleich mit dem langjährigen Mittel deutlich milderem Klima zuzurechnen sind, bleibt zu beweisen. Der niedrigste Verbrauch der letzten zehn Jahre in den Sektoren Haushalte und GHD zeigt sich im Jahr 2007. Beide Verbrauchersektoren bestimmen ihren Energieverbrauch in hohem Maße durch den Verbrauch an Raumheizwärme. Der in dem betrachteten Zeitraum wärmste Winter war ebenfalls im Jahr 2007, was sich auf den Endenergieverbrauch dieser Verbrauchergruppen durchschlägt (TZSCHEUTSCHLER et al. 2009). Außerdem ist auffällig, dass die signifikanten Verringerungen im spezifischen Energieverbrauch in den Jahren nach 2000 eng an die Erhöhung der Verbraucherpreise gekoppelt sind, so dass die erzielten Einsparungen neben

verbesserten technischen Maßnahmen auch auf eine Umstellung des individuellen Nutzungsverhaltens zurückgeführt werden können (DESTATIS 2009).

Obwohl in Deutschland im internationalen Vergleich bereits ein sehr hoher energiewirtschaftlicher Standard erreicht ist, ist sowohl bei der Energieerzeugung als auch bei möglichen Einsparpotentialen in nahezu allen Bereichen noch Raum zur Verbesserung. Der in technischer Sicht vergleichsweise hohe Standard birgt aber auch die Problematik der teuren letzten Prozente in sich. Anders ausgedrückt sind Verbesserungsmaßnahmen, die auf einem niedrigen Niveau ansetzen, in der Regel effektiver und kostengünstiger zu realisieren als Optimierungen, die auf einem Niveau nahe dem physikalisch erreichbaren Grenzwert aufbauen. Neben der begrenzten Ressource Energie muss daher auch ein verantwortungsvoller Umgang mit der ebenfalls begrenzten Ressource Geld in die Bemühungen um energieeffizientes Handeln und Bauen eingehen (BOHNENSCHÄFER et al. 2005).

Bei den Zukunftsentwicklungen wird neben der Realisierung neuer Niedrig- und Nullenergiehauskonzepte, bei denen eine entsprechende Wärmedämmung den nötigen Energiebedarf auf die anzuwendende Regelungs- und Lüftungstechnik reduziert, vor allem aber auch die Sanierung im Bestand an Bedeutung gewinnen und große Einsparpotentiale ermöglichen, die vor dem Hintergrund gestiegener Eigentums- und Mietwerte an Attraktivität gewinnen wird. In jedem Fall kann eine fachgerechte und sowohl technisch als auch ökologisch auf den Bedarfsfall ausgelegte Dämmung als Grundlage für die Verwirklichung zukünftiger Energieeinsparpotentiale im Bereich Raumwärme angesehen werden.

### 1.2 Marktentwicklungen

Auch wenn der Dämmstoffmarkt aktuell stagniert, so liegen die Einbußen hinter den Branchenzahlen der gesamten Baubranche zurück. Das Marktvolumen für Dämmstoffe, gemessen in m<sup>3</sup> verbautem Material, lag im Jahr 2005 bei 24,46 Mio m<sup>3</sup>, was im Vergleich zum Vorjahr zwar einen Rückgang um 3,1 % darstellt, der gegenüber dem Verlust des Jahres 2004 – hier waren es noch rund 4,3 % – aber schwächer ausfällt. Vergleicht man diese Zahlen mit den Entwicklungen der Baubranche insgesamt, so ist festzustellen, dass der seit dem Wegfall der Eigenheimzulage deutlich zu beobachtende Rückgang der erteilten Baugenehmigungen im Dämmstoffbereich von der steigenden Anzahl an Renovierungen und Wärmeschutzmaßnahmen im Bestand aufgefangen werden konnte. Auch eine Marktstudie der Interconnection Consulting Group zur Situation des Dämmstoffmarktes im Jahr 2006 kommt zu dem Ergebnis, dass der Tiefpunkt inzwischen wohl erreicht ist (ANONYMUS 2006b).

Will man zwischen den Marktanteilen der unterschiedlichen Produktgruppen differenzieren, so reduziert sich die Betrachtung im Wesentlichen auf drei Segmente. Der Markt teilt sich auf zwischen den mineralischen Dämmstoffen mit ca. 59 % auf Platz eins und den Schaumkunststoffen, die ca. 37 % des verbauten Volumens beanspruchen. Die Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe konnten zwar an Bedeutung gewinnen, liegen mit einem Anteil von 4 – 5 % aber immer noch deutlich hinter den anderen Produktgruppen zurück (ANONYMUS 2007b). Durch das von 2003 bis 2007 laufende Förderprogramm des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) für eine Reihe von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe stiegen die Absatzmengen für die geförderten Produkte von vorher 60.000 m<sup>3</sup>/a auf 130.000 m<sup>3</sup>/a im Jahr 2007. In der Studie von EICKE-HENNIG 1997 wurde prognostiziert, dass alternative Dämmstoffe langfristig einen Marktanteil von 9 % - 13 % erzielen könnten. Dieser Marktanteil ist heute, mehr als zehn Jahre später, allerdings noch nicht realisiert.

Die Ursachen für den immer noch eher zögerlichen Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Dämmstoff sind dabei nicht allein in den höheren Preisen zu suchen, sondern lassen sich auch auf bestehende



Vorbehalte und mangelndes Wissen der Architekten und Bauherren über die Vorteile von Naturbaustoffen zurückführen (ANONYMUS 2007a).

### **1.3 Dämmstoffe auf Basis von Hobel- und Sägewerksnebenerzeugnissen**

Die Verwendung von Hobel- und Sägewerksnebenerzeugnissen als Dämmmaterial ist nicht prinzipiell neu, sondern kann in der bauhistorischen Vergangenheit auf eine lange Anwendung zurückblicken. Vor allem in Skandinavien war der Einsatz dieser Materialien weit verbreitet und entsprechend dokumentiert (GRANUM 1951, SKJELMERUD 1960, UUSVAARA 1974). Der Einsatz von Spänen zur Dämmung war dabei in früheren Zeiten ein unreglementierter Vorgang, bei dem die Verwertung der im eigenen Betrieb oder in der näheren Umgebung anfallenden Reststoffe im Vordergrund stand. Neben einer Verwendung zur Eindeckung von Rillensaat, um ein Auffrieren der Keimlinge zu verhindern oder zur Eindeckung von Eisschobern zur Aufbewahrung von Wintereis in die Sommermonate hinein, wurde das Material auch zur Dämmung von Zwischen- und Außenwänden, nicht nur von Wohngebäuden oder Stallungen, sondern auch in Schiffsrümpfen, Bienenstöcken und ähnlichen Anwendungsbereichen verwendet (VORREITER 1943). Bei jüngeren Begutachtungen von Sägespandämmungen, die vor 80 – 90 Jahren eingebaut wurden, konnte kein beeinträchtigender Befall durch Pilze, Insekten oder Mäuse festgestellt werden. Die Dämmschichten waren in einem guten Zustand. (NILSSON 1996)

Inzwischen gibt es seit ca. 1993 die ersten bauaufsichtlich zugelassenen Wärmedämmstoffe auf Basis von losen Holzspänen und Fasern, denen nun klare Anforderungen an die Materialeigenschaften auferlegt sind (u. a. DIBT 2006, DIBT 2007A, DIBT 2007B). Es existieren u. a. Anforderungen und Prüfvorschriften zu Wärmeleitfähigkeit, Setzungsverhalten, hygroskopischem Verhalten, Brandverhalten und Schimmelpilzbeständigkeit.

## 2 Zielsetzung

Im Folgenden wird die Problemstellung, die Zielsetzung sowie der hieraus abgeleitete Untersuchungsbedarf dargestellt.

### 2.1 Problemstellung

Lose eingebrachte Dämmstoffe sind im Verlauf ihrer Nutzung unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt. Angefangen beim Transport vorgefertigter und fertig gedämmter Fertighausbauteile auf die Baustelle, über die Montage dieser Wandbauteile bis hin zur Nutzung unterliegt das eingebrachte Material einer Vielzahl von impulsartigen Laststößen und Schwingungsanregungen. Findet aufgrund dieser Belastungen eine Verdichtung des Materials statt, so können sich Hohlräume, d. h. ungedämmte Bereiche, bilden, die als Wärmebrücke fungieren und die Funktionalität des Wandbauteils bezüglich seiner Wärmeleitfähigkeit beeinträchtigen. Der Setzung wird durch die Einbringung einer als volumenstabil angenommenen Materialdichte entgegengewirkt.

Ein Maß für den Widerstand, den ein Material einem stationären Wärmestrom entgegensetzt, ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $W/(m \cdot K)$ ]. Diese ist eine von unterschiedlichen Randbedingungen (Feuchte, Einbringdichte, Partikelstruktur) abhängige Materialkonstante, die ausgeprägte Minimalbereiche aufweisen kann. Ist nun der Rohdichtebereich zur Sicherstellung einer möglichst niedrigen Wärmeleitfähigkeit niedriger als die volumenstabile Einbringdichte, so entfaltet der Dämmstoff bei volumenstabiler Einbringdichte nicht seine optimale Wärmeleitfähigkeit oder ist bei niedrigeren Einbaudichten der Gefahr der Setzung unterworfen.

Im Weiteren sind neben den rein materialspezifischen Fragestellungen auch die Erzeugungsbedingungen bisher eingesetzter Materialien kritisch zu betrachten. Lose Dämmstoffe auf Spanbasis basieren in der Regel auf einer Absiebung unbrauchbarer Partikel eines aus verschiedenen anderen industriellen Prozessen heraus erzeugten Spankollektivs. Die letztlich eingesetzten Gutmengen betragen dabei oft nur 50 % des eingekauften Materials (EIBER 2007). Relativ geringen Entstehungskosten als Nebenerzeugnis des eigentlichen Wertschöpfungsprozesses stehen also die Kosten für eine oft aufwändige Materialaufbereitung mit unterschiedlichen Sichts- und Siebungsstufen entgegen.

### 2.2 Projektziele

Hohe Setzungssicherheit und niedrige Wärmeleitfähigkeit bei geringen Dichten erfordern unterschiedliche Partikelstrukturen, weshalb durch eine Kombination unterschiedlicher Span- und Faserstrukturen ein optimierter loser Dämmstoff entwickelt werden soll.

Zur Optimierung der Setzungssicherheit wird eine tragende Struktur aus möglichst großvolumigen und federelastischen Spänen (FES) erzeugt (Material A), deren Hohlräume mit einem Mischungspartner (Material B), der die Wärmeleitfähigkeit verringert, ausgefüllt werden. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, bei denen es um eine höherwertige Nutzung der in Hobel- und Sägeprozessen zwangsläufig anfallenden Nebenerzeugnisse ging, wird hier ein in seinen Eigenschaften speziell auf seine Volumenstabilität bei geringen Einbaudichten hin optimierter Frässpan eingesetzt. Das verwendete Spangut soll später über Kegelstirnplanfräser erzeugt werden (WEGENER UND HEISEL 2007, HEISEL et al. 2009). Die Werkzeug- und materialeitig optimalen Zerspanungsbedingungen zur Erzeugung eines FES, welches eine möglichst geringe volumenstabile Dichte aufweist, wurden am IfW in Stuttgart in einem parallel laufendem Vorhaben bestimmt (Heisel 2009).

## 2.3 Untersuchungsbedarf

Im Folgenden werden die zu untersuchenden Problemfelder beschrieben. Die Versuche teilen sich auf in eine Reihe von Vorversuchen, die der Evaluierung eines breiten Spektrums an Mischungspartnern dient. Die hier ermittelten Materialkennwerte bilden die Basis für eine Reduktion der Materialien (Material B), die in den Hauptversuchen einer näheren Untersuchung unterzogen werden. Der eingesetzte Mischungspartner muss dazu geeignet sein, mit dem FES (Material A) in Mischung gebracht zu werden. Hierzu ist die Erprobung materialspezifischer Mischmethoden erforderlich.

Um das zur Auswahl stehende Materialspektrum zu reduzieren, soll in einer Reihe von Vorversuchen das Setzungsverhalten der Materialien bei einer definierten Vibrationsbeanspruchung untersucht werden. Die Forderung nach einer reproduzierbaren und quantifizierbaren Belastung führt zu der Entwicklung einer Prüfeinrichtung, die einerseits genügend Differenzierungspotential bietet, andererseits das Material nicht Belastungsspitzen aussetzt, die in der realen Einbausituation nicht vorkommen. Es wird ein Kleinprüfstand sowie ein Bauteilversuch entwickelt, mit dem unterschiedlichste Materialien unter vergleichbaren Bedingungen auf ihre Volumenstabilität hin untersucht werden können.

Neben der Volumenstabilität ist die Wärmeleitfähigkeit in  $W/(m \cdot K)$  das entscheidende Kriterium bei der Bewertung eines Dämmstoffes. Da die Wärmeleitfähigkeit eines schüttfähigen Materials über den möglichen Dichtebereich hinweg zumeist einen Optimalbereich aufweist, wird die Wärmeleitfähigkeit bei (ausgehend von der Schüttdichte) sukzessiv erhöhten Dichten gemessen.

In den Hauptversuchen folgen schließlich weitere Untersuchungen zum stationären und instationären Temperaturverhalten sowie Prüfungen zum Setzungsverhalten, mit dem Ziel, die Abhängigkeit zwischen Eigenschaften und Materialcharakteristik abzubilden. Weil bisher noch keine weiter reichenden Untersuchungen zur Abhängigkeit der untersuchten Materialeigenschaften vom Mischungsverhältnis zwischen Span- und Faserstoffen existieren, werden die Wärmeleitfähigkeit und das Setzungsverhalten bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen untersucht. Dabei sind, wie in Abbildung 2-1 verdeutlicht, unterschiedliche Szenarien denkbar. Neben einem linearen Verlauf der Eigenschaftsausprägung in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses können auch lokal begrenzte oder ausgedehnte Maxima oder Minima auftreten.

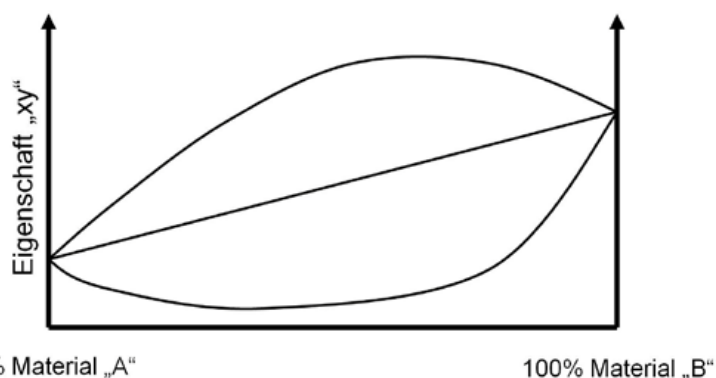


Abbildung 2-1 Mögliche Eigenschaftsverläufe bei Mischungen zweier Materialien „A“ und „B“

Neben den bereits genannten Prüfungen werden in weiterführenden Versuchen außerdem das Brandverhalten, das hygroskopische Verhalten und die Schimmelpilzbeständigkeit ausgewählter Materialvarianten näher untersucht. Das Ziel ist die Erfassung anwendungsspezifisch relevanter Materialkennwerte sowie eine Beschreibung deren Abhängigkeit von der Materialcharakteristik, um zukünftig durch eine Kombination unterschiedlicher Partikelsortimente eine gezielte Produktoptimierung betreiben zu können.

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird ein Überblick über die physikalischen und verfahrenstechnischen Grundlagen, das eingesetzte Material sowie die Charakterisierung unterschiedlicher am Markt verfügbarer und bisher untersuchter Dämmstoffmaterialien und -systeme gegeben.

#### 3.1 Physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen

Wärmeleitfähigkeit, Volumenstabilität und Mischungsstabilität sowie die prinzipielle Mischbarkeit unterschiedlicher Materialien sind relevante Eigenschaften für die Beurteilung von losen Kompositdämmstoffen. Die genannten Kennwerte haben dabei ihren Ursprung in der Partikelgeometrie, der Partikeldichte und der Einbaudichte – also der inter- und intrapartikulären Materialstruktur. Will man mit messtechnisch ermittelten Eigenschaftskongretisierungen stichhaltig argumentieren, so sind eindeutige Begriffsdefinitionen und die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge unabdingbar. Bei der Beschreibung von Stoffgemischen muss man sich außerdem auf einige verfahrenstechnische Begrifflichkeiten zur Charakterisierung disperser Systeme verständigen.

##### 3.1.1 Wärmeübertragung

Wärmeübertragung bedeutet Wärmetransport – dieser kann auf drei unterschiedlichen Wegen stattfinden. Der Wärmetransport durch Leitung basiert auf der Übertragung kinetischer Energie zwischen benachbarten Atomen und Molekülen eines Stoffes. Wärmestrahlung wird über elektromagnetische Wellen übertragen, während die Konvektion, als dritte Möglichkeit der Wärmeübertragung, auch als Wärmeströmung bezeichnet werden kann und die mitgeführte innere Energie eines strömenden Fluids bezeichnet (KUCHLING 2001). Die Wärmeleitung in einem Körper unter definierten Randbedingungen (stationäre Wärmeleitung, d. h.  $\Delta T = \text{konst.}$ ), wird dabei durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] beschrieben. Der Wärmeübergang beschreibt dagegen die Wärmeübertragung zwischen einem flüssigen oder gasförmigen Körper und einem festen Körper anderer Temperatur und bestimmt sich über den Wärmeübergangskoeffizienten. Dem in der Baupraxis relevanten Fall, nämlich dem Wärmedurchgang durch einen festen Körper (Wand), der zwei in der Regel gasförmige Körper (Außen- und Innenatmosphäre) unterschiedlicher Temperatur trennt, liegen also zwei Wärmeübergänge und eine Wärmeleitung durch den Feststoff zu Grunde.

Neben einem Wärmetransport durch Leitung im Feststoff wirken in einer porigen Materialstruktur immer auch Wärmetransporte durch Konvektion und Strahlung. Das Zusammenwirken dieser drei Wärmetransportvorgänge wird beispielsweise von CAMMERER 1995 als äquivalente Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. Der Wärmetransportvorgang durch eine Pore und deren begrenzende Umhüllung wird von SPITZNER 2001 mit Hilfe eines Ersatzschaltbildes der einzelnen Wärmetransportwiderstände aus den unterschiedlichen Wärmeübergängen und Wärmeleitungen beschrieben. Wenn im Weiteren der Begriff Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gebraucht wird, so ist dieser bei den untersuchten porösen Systemen als äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu verstehen.

Der Werkstoff Holz – in seiner Ausprägung als Feststoff – kann über die unterschiedlichen Holzarten hinweg als ein poriges System unterschiedlicher Rohdichte und Materialfeuchte angesehen werden. Liegt Holz als zerspanntes oder zerspanntes Material vor, so kann das Gefüge hinsichtlich der Porosität im Weiteren auch als gemischtporig bezeichnet werden (VOGEL et al. 1999). Dabei hängen die dämmenden Eigenschaften neben der Porengröße, -anzahl und -verteilung auch von der Rohdichte, der Faserrichtung (längs und quer) sowie der Materialfeuchte ab (AUTORENKOLLEKTIV 2003). Das von der Rohdichte abhängige Porenvolumen führt dazu, dass sich die Wärmeleitfähigkeit eines porigen

Materials zwischen der Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft, was einem theoretischen Porenvolumen von 100 % entspricht, und der Reindichte des Zellwandmaterials (theoretisches Porenvolumen 0 %) bewegen muss. Für Holz liegt dieser Bereich zwischen  $\lambda_{\text{Luft}} = 0,026 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  und  $\lambda_{\text{Holz}\perp} = 0,407 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  (quer zur Faser).

Der Unterschied zwischen  $\lambda_{\text{Holz}\perp}$  und  $\lambda_{\text{Holz}\parallel}$  (längs zur Faser) wird je nach Untersuchung mit dem Faktor  $\lambda_{\text{Holz}\perp} : \lambda_{\text{Holz}\parallel} = 1 : 2 \dots 1 : 2,5$  angegeben (GRIFFITHS UND KAYE 1923; NARAYANAMURTI 1936). Als physikalische Begründung können die in Längsachse der Holzfaser angeordneten Zelluloseketten herangezogen werden, entlang derer die Übertragung kinetischer Energie zwischen benachbarten Molekülen und Atomen in Form von Schwingungen leichter vonstattengeht, als dies bei der durch amorphe Lockerstellen unterbrochenen Struktur quer zur Holzfaser funktioniert (KOLLMANN UND MALMQUIST 1956).

Von praktischer Bedeutung ist überwiegend  $\lambda_{\text{Holz}\perp}$ . In DIN 4108-4 sind für unterschiedliche Holzarten Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit hinterlegt (Exemplarisch: Fichte/Kiefer/Tanne:  $0,13 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ ; Buche/Eiche  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ , Spanplatte  $0,17 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ ). In KOLLMANN UND MALMQUIST 1956 werden grundlegende Untersuchungen über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Vollholz und Holzwerkstoffen parallel und quer zur jeweils vorliegenden Faserstruktur vorgestellt. Für gebundene Span- und Faserplatten sind die Einflüsse aus Bindemittelgehalt und anderen Zuschlagstoffen vernachlässigt worden, weshalb die Überlegungen im Prinzip auch auf lose Dämmstoffe übertragen werden können. Insbesondere wird eine theoretisch begründete Formelbeziehung entwickelt, die den Einfluss des in der Arbeit als Brückeneffekt bezeichneten Einflusses der Faserlage zueinander berücksichtigt. Anstoß dieser Überlegungen ist die Feststellung, dass, bei gleicher Rohdichte, Vollholz die höchsten, Faserplatten die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten aufweisen, während die Werte von Spanplatten dazwischen liegen. Entscheidenden Einfluss auf die Bildung von Wärmebrücken über Wärmeleitung (und damit auf die Wärmeleitung des Stoffes) hat also – unter Annahme der bereits genannten Vereinfachungen – die Anordnung der Fasern und Späne im Verbund.

Theoretisch sind bezüglich der Anordnung faser- oder röhrenförmiger Elemente zwei Grenzfälle denkbar. Entweder liegen die Partikel in einem Winkel von  $90^\circ$  gekreuzt zueinander vor oder sie sind deckungsgleich parallel nebeneinander angeordnet. Im ersten Fall lässt sich eine punktförmige, im zweiten Fall eine linienförmige Kontaktfläche annehmen. Für Vollholz wird in einer vereinfachten Betrachtung eine parallele Anordnung vorausgesetzt, für Faserplatten eine überwiegend kreuzförmige Verfilzung und für Spanplatten ein Zustand der zwischen diesen beiden Extremen liegt. Jede Materialgruppe wird nun mit einem Brückenfaktor belegt, der in das idealisierte Luft-Faser-Schichtungsmodell (wieder unterschieden nach längs und quer) eingerechnet wird. Ein Vergleich des so errechneten Kurvenverlaufes mit empirisch ermittelten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung und stützt somit auch die getroffene Annahme, dass der Brückenfaktor über den betrachteten Rohdichtebereich hinweg als konstant anzunehmen ist. Im Bereich höherer Dichten gehen die von null bis  $800 \text{ kg}/\text{m}^3$  linear verlaufenden Funktionen in eine relativ steile Kurve über und treffen sich schließlich in einem Punkt bei  $1500 \text{ kg}/\text{m}^3$  (der Reindichte der Holzsubstanz). Weitere Untersuchungen, die sich mit den thermischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen beschäftigen, werden unter anderem in KÜHLMANN 1962, KISSELOFF 1969, SCHNEIDER UND ENGELHARDT 1977, SULEIMAN et al. 1999 beschrieben.

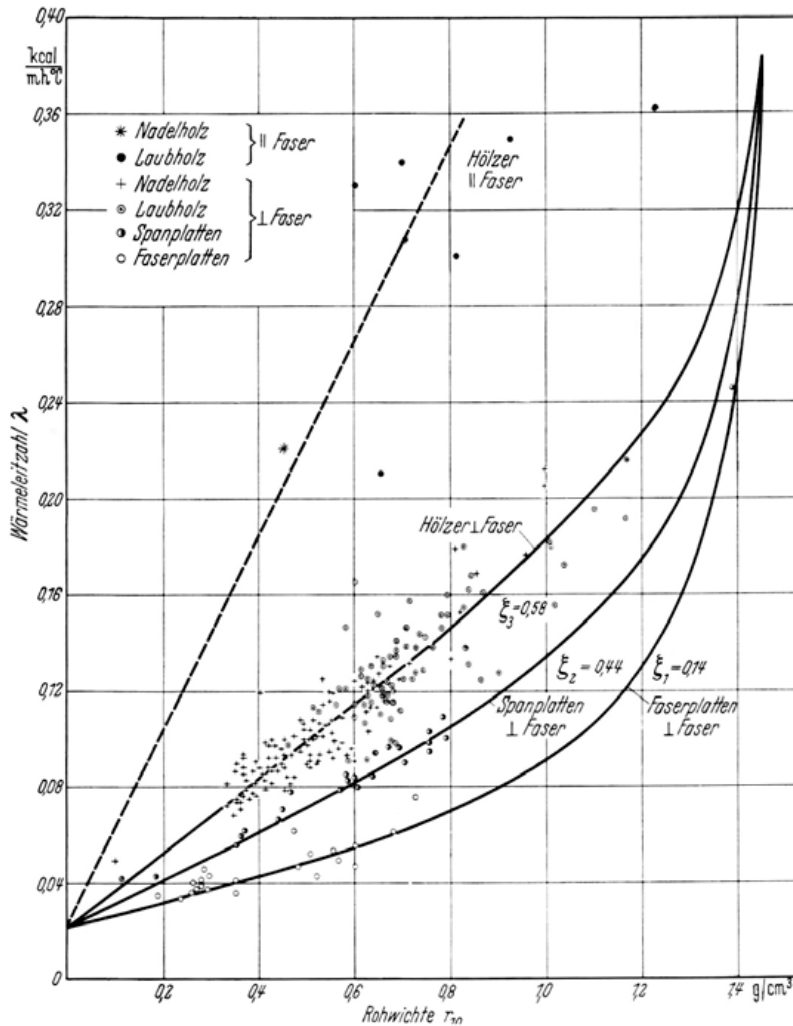


Abbildung 3-1 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte (Darstellung aus KOLLMANN UND MALMQUIST 1956)

Um den Wärmeübergang durch Konvektion möglichst zu reduzieren, muss das in den Poren eines Systems eingeschlossene Luftvolumen beruhigt werden, sodass keine Strömungsprozesse innerhalb der Dämmschicht auftreten können. Idealerweise werden hierzu möglichst viele, gegeneinander abgeschlossene Hohlräume erzeugt. Neben der freien Konvektion innerhalb des Dämmstoffes muss natürlich auch die Einbausituation beachtet werden. So sollte eine von außen erzwungene Luftströmung in der Wärmedämmung möglichst durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden (HENS 1991).

Um den Grad der Abgeschlossenheit der Porenvolumen innerhalb eines Materials zu beurteilen, könnte der Luftdurchlasswiderstand ein geeignetes Maß darstellen. Ein weitgehend beruhigtes Luftvolumen würde sich in geringen Luftdurchlässen widerspiegeln, die mit der Abnahme der Wärmeleitfähigkeit korrelieren sollten. Im Rahmen einer Untersuchung zur Eignung unterschiedlicher biogener Fasern zur Wärmedämmung wurde nachgewiesen, dass die Variabilität der Wärmeleitfähigkeit mit dem Luftdurchlasswiderstand mit dem Faktor 0,94 korreliert (MURPHY 1998).

In WEGENER et al. 2004 werden für eine Reihe von Hobelspänen, einen Faserstoff und ein Sägespänsortiment der längenbezogene Strömungswiderstand in  $\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  und die Wärmeleitfähigkeit, ermittelt bei vergleichbaren Dichten, angegeben, aber nicht auf Korrelation untersucht.

Bei WEGENER UND HEISEL 2007 wird für aus Altpapier hergestellte Altpapierflocken ein Zusammenhang zwischen Luftdurchlässigkeit und Wärmeleitfähigkeit vermutet. Um den Einfluss der Konvektion auf die Wärmeleitfähigkeit des Materials zu untersuchen, wurden in FNR 2007 an Nadelholzspänen Messungen der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Rohdichten in einer evakuierten Umgebung und unter Normaldruck ausgeführt. Zur Messung wurde ein instationäres Messprinzip gewählt, das eine schnelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ermöglicht. Hierbei dient ein sogenannter Transient Hot Strip gleichzeitig als Wärmequelle und Widerstandsthermometer. Aus den ermittelten Daten kann die Wärmeleitfähigkeit des Materials berechnet werden. Ein ähnliches Verfahren, die sogenannte Hitzdraht-Methode wird auch von EBERT 2002 beschrieben. Die in FNR 2007 beschriebenen Vergleichsmessungen in evakuierter Atmosphäre und unter Normaldruck zeigten relativ die gleiche Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Einbringdichte. Der im Vakuum ermittelte Zusammenhang ist gegenüber den Verhältnissen unter Normaldruck lediglich nach unten hin verschoben. Ein Einfluss der Konvektion auf den Wärmetransport in der Probe kann daher ausgeschlossen werden.

Laut CAMMERER 1995 hat der Anteil der Porenkonvektion erst ab Hohlraumgrößen  $> 8$  mm und bei Temperaturen  $> 10^{\circ}\text{C}$  einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Ein relevanter Konvektionseinfluss im Dämmstoff kann sich jedoch trotzdem ausbilden, wenn kleinere Poren miteinander verbunden sind. Größeren Einfluss hat der Strahlungsanteil, der sich ab Porengrößen von  $> 0,1$  mm auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt (CAMMERER 1995).

Der Einfluss der Holz- respektive Pflanzenart auf die Wärmeleitfähigkeit daraus hergestellter Faserstoffe ist vergleichsweise gering (MURPHY 1998). Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit beruhen hier in erster Linie auf der Feinheit der Fasern, was auch die Korrelationen zwischen Luftdurchlasswiderstand und Wärmeleitfähigkeit (zumindest für Faserstoffe) erklärt, da der Luftdurchlasswiderstand ein indirektes Maß für die Qualität des Faseraufschlusses darstellt. MURPHY 1998 kommt deshalb zu der Schlussfolgerung, dass alle Maßnahmen, die die Feinheit der Fasern vergrößern, die Wärmeleitfähigkeit verbessern. Das bessere Wärmedämmpotential von Flachs-, Jute- und Baumwollfasern gegenüber den relativ gröberen Hanffasern lässt sich also in erster Linie durch den Faserquerschnitt erklären. Dem ebenfalls oft diskutierten Vorteil hohler Fasern, gegenüber soliden Faserquerschnitten, kann hingegen eine untergeordnete Bedeutung beigemessen werden, da der Anteil der Fasermikrostruktur gegenüber der Gesamtstruktur des Dämmstoffes relativ klein ausfällt.

Die Wärmeleitfähigkeit von Faserstoff aus unterschiedlichen Holzarten wird auch bei HEINRICH 2004 untersucht. Bei einem Vergleich von Fasern aus Fichte, Kiefer, Buche und Pappel konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die Holzart bei Faserstoff offensichtlich keinen signifikanten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Alle Materialien bewegten sich um  $\lambda = 0.040 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  und waren somit gut als Wärmedämmstoff geeignet.

Auch ein Vergleich von speziell hergestellten Frässpänen weitgehend gleicher Spangeometrie, aber aus unterschiedlichen Laub- und Nadelholzarten, zeigte, dass die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte, über die Rohdichteunterschiede der Holzarten hinaus, keinen holzartenspezifischen Einflüssen unterworfen ist (SCHUNK 2009, SCHUNK et al. 2009)

Auch von SCHEIDING 2000 wird vertieft auf die Wärmeleitfähigkeit von losen, in thermomechanischen Refinerprozessen hergestellten Faserstoffen, speziell der Holzart Fichte, eingegangen. Das Material wurde dabei sowohl im Rohzustand als auch fraktioniert bei unterschiedlichen Dichten auf seine Wärmeleitfähigkeit geprüft. Als Schlussfolgerung wird (analog zu MURPHY 1998) festgestellt, dass die feineren Faserfraktionen bei gleicher Dichte die günstigeren Werte erreichen. Die physikalische

Erklärung stützt sich dabei auf folgende Zusammenhänge. Zum einen wird über die kleineren Faserzwischenräume eine geringere Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion stattfinden, zum anderen wird die schlechtere Wärmeleitung der feineren Faserquerschnitte für den Effekt verantwortlich gemacht. Bei zunehmenden Einbaudichten nehmen die Wärmeleitfähigkeiten aller Fraktionen ab, wobei es in jedem Fall einen Bereich niedrigster Wärmeleitfähigkeit gibt. Aufgrund der ermittelten Ergebnisse können auch Analogien zu den entsprechenden Zusammenhängen bei Mineralfasern gezogen werden. Der Einfluss der Feinheit der Fasern und der Einbringdichte beruht hier im Prinzip auf den gleichen Wirkmechanismen.

Die Wärmeleitfähigkeit von Spansortimenten war in der Vergangenheit – auch im Vergleich mit Faserstoffen – Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass fein aufgeschlossene Faserstoffe die durchgängig günstigeren Wärmeleitfähigkeitswerte erreichten. Zur Variabilität der Wärmeleitfähigkeit von Spanmaterialien über steigende Einbringdichten hinweg stellt VOGEL 1999 fest, dass eine deutliche Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit erst dann eintritt, wenn bei höheren Dichten die bis dahin linienförmigen Berührungsflächen der flächig gekrümmten und lose aufeinander liegenden Einzelpartikel einem flächigen Kontakt weichen und die damit verbundene Vergrößerung der entstehenden Wärmebrücken den Anteil der Wärmeleitung im Feststoffanteil des dispersen Systems ansteigen lässt, was sich aufgrund des (bereits beschriebenen) Verhältnisses von  $\lambda_{\text{Luft}}$  zu  $\lambda_{\text{Holz}}$  nachteilig auf die Wärmeleitfähigkeit des Materialgemisches auswirkt. Diese Aussage folgt im Prinzip der bei KOLLLMANN UND MALMQUIST 1956 entwickelten Theorie der Ausbildung von Wärmebrücken. In einem relevanten Dichtebereich ist also offensichtlich auch für Spanmaterialien die Ausbildung einer abgeschlossenen Porenstruktur wichtiger als die Holzart. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Bereich niedriger Rohdichte wird über den Strahlungsanteil erklärt, der bei größer werdenden Porendurchmessern steigt (CAMMERER 1995). Im Weiteren könnte sich wie beschrieben auch der Anteil der Konvektion bei großen Porendurchmessern, die teilweise auch untereinander verbunden sein können, für den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Bereich niedriger Dichte verantwortlich zeigen.

An drei Experimentierhäusern in Holzbauweise (Rosenheimer Haus) wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten der eingebrachten Hobelspandämmungen untersucht. Das Material wurde mit einer Einbaudichte von  $70 \text{ kg/m}^3$  in Gefache mit 225 mm oder 320 mm Dicke eingebracht. Mit der Standardkonstruktion (bei 225 mm Dämmschichtdicke) konnten Wärmedurchgangskoeffizienten von  $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden; die hochgedämmten Bauteile erreichten bei einer Dämmschichtdicke von 320 mm mit k-Werten von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  bereits den Passivhausstandard. (SCHWARZ 1999)

Weitere Untersuchungen, die sich mit der Wärmeleitfähigkeit unterschiedlichster Spansortimente beschäftigen, finden sich unter anderem in VOGEL et al. 2002, WEGENER et al. 2004 und EISENHUT 2008.

Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit im Labor werden stets darrtrockene Materialproben verwendet. Die so ermittelten Messwerte dürfen aber nicht sofort in die baupraktische Bemessung einfließen, sondern müssen mit einem Abschlag versehen werden, der den Einfluss von Feuchte im Material berücksichtigt. Der sogenannte Bemessungswert stellt also eine Negativprognose dar, in der versucht wird, die Auswirkungen der im Material akkumulierten Feuchte zu quantifizieren. Neben den dargestellten Abhängigkeiten von der Faserstruktur besteht ein deutlicher Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt des Materials. Eine Erhöhung der Materialfeuchte von Holz um 1,0 % führt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 1,25 % (AUTORENKOLLEKTIV 2003). Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Feuchte und Wärmeleitfähigkeit an anderen Baustoffen wie Beton, Ziegel, etc. bestätigen ebenfalls eine lineare Abhängigkeit (CAMMERER 1995). Die Wärmeleitfähigkeit wird



dabei vor allem von freiem Wasser in den interpartikulären Hohlräumen beeinflusst (u. a. CAMMERER 1987, CAMMERER 1995, BLÄSI 2002, FNR 2007). Bei mineralischen Baustoffen ist der Einfluss der Materialfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit deutlich höher. KÜNZEL 1989 stellte beispielsweise für Ziegel eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit je Massenprozent Feuchtezunahme von 16 % fest; für Leichtbeton immerhin noch 4 %. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen sollte eigentlich unter Berücksichtigung des für jedes Material individuellen Sorptionsverhaltens vorgenommen werden, was aktuell jedoch nicht geschieht (u. a. KÜNZEL 1982, FNR 2006).

Neben einer Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit durch freies Wasser in den Poren ist auch bei nichthygroskopischen Dämmstoffen ein Einfluss von Feuchtebewegungen im Material für die Wärmeleitfähigkeit relevant. Für mineralische Baustoffe stellt KÜNZEL 1989 fest, dass ein Feuchtetransport durch Kapillarleitung und Dampfdiffusion nur während der überhygroskopischen Phase in der Trocknungsphase nennenswerten Einfluss auf den Wärmetransport ausübt; nach Abschluss der Bauaustrocknung ist dieser Wärmetransportmechanismus vernachlässigbar. Nach CAMMERER UND ACHTZIGER wird sich in der Regel, verursacht durch den praktischen Feuchtegehalt der begrenzenden Baustoffe und dem Temperaturgradienten in der Wand, jedoch ein Dampfdruckgefälle einstellen, welches zu einem Wasserdampfdiffusionsvorgang durch das Bauteil hindurch führt. Mit diesem Wasserdampfdiffusionsstrom ist ein Wärmetransport verbunden, der auch bei nichthygroskopischen Baustoffen in einem Feuchtigkeitszuschlag gegenüber der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand berücksichtigt werden muss (CAMMERER UND ACHTZIGER 1990, CAMMERER UND ACHTZIGER 1992).

Neben dem Wärmeschutz im Winter ist auch der sommerliche Wärmeschutz ein wichtiges Thema bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Wärmedämmstoffes. Hier sind neben der Wärmeleitfähigkeit, die den Wärmetransport unter stationären Bedingungen beschreibt, vor allem das Verhalten des Dämmstoffs unter instationären Wärmeströmen im Bereich der Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht entscheidend. Das Temperaturverhalten eines Materials in Abhängigkeit der Zeit bei einem bestimmten  $\Delta T$  wird von der Temperaturleitfähigkeit  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] und dem Wärmeeindringkoeffizient  $b$  [ $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{0.5})$ ] bestimmt (BAEHR UND STEPHAN 2008). Die Temperaturleitfähigkeit berechnet sich zu  $a = \lambda / (\rho \cdot c)$ , mit  $\rho$  = Dichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] und  $c$  = spezifische Wärmekapazität [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]. Je größer der Wert von  $a$  ist, um so besser und schneller verteilt sich die Wärme im Material. Der Wärmeeindringkoeffizient berechnet sich zu  $b = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{0.5}$ . Je größer der Wert von  $b$  ist, umso langsamer dringt Wärme in das Material ein. Ein guter sommerlicher Wärmeschutz erfordert unter den Gesichtspunkten einer guten Dämpfung der Temperaturamplituden (Temperaturamplitudenverhältnis TAV [-]) während der heißen Stunden am Tag und einer möglichst verzögerten Weiterleitung des maximalen Temperaturpeaks (Phasenverschiebung  $\varphi$  [-]) also eine möglichst niedrige Temperaturleitfähigkeit und einen hohen Wärmeeindringkoeffizienten.

Ein guter Zusammenhang besteht zwischen der Wärmespeicherzahl  $S$  [ $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ] =  $c \cdot \rho$  und der Phasenverschiebung. Holz bietet hier aufgrund seiner hohen Wärmekapazität vor allem in Verbindung mit höheren Rohdichten (z. B. in der Verarbeitung als Holzfaserdämmplatte) Vorteile gegenüber Mineralfasern und Polystyrolen (u. a. KÖNIGSTEIN 2009).

### 3.1.2 Zur Volumenstabilität loser Dämmstoffe

Im Gegensatz zu platten- oder mattenförmigen Dämmstoffen, die ihre Form über den Zusatz von Bindemitteln (Trockenverfahren) oder die Ausnutzung natürlicher Bindekräfte (poröse Fasermatten im Nassverfahren) erhalten und im eingebauten Zustand weitgehend formstabil bleiben, besteht bei schüttfähigen Materialien die Gefahr der Setzung, was in der Folge zu ungedämmten Hohlräumen, d. h. Wärmebrücken führt; und einer Separierung der unterschiedlichen Partikelgeometrien und -

größen (zumeist durch Absetzen des Feinanteils), was eine inhomogene Dämmschicht und in der Folge einen über die Wandfläche hinweg uneinheitlichen Wärmedurchgang provoziert.

Die Gefache in der Holzrahmenbauweise weisen heute üblicherweise eine Breite von 0,625 m auf und erreichen eine Höhe von 2,50 m. Eher selten sind Breiten bis 0,825 m. Innerhalb des Lebenszyklusses eines Hauses wirken höchst unterschiedliche Belastungen in Form von Schwingungen und stoß- oder klopförmigen Anregungen auf die Bauteile ein. Eine Quantifizierung gestaltet sich schwierig, da neben der Erfassung aller denkbaren schwingungserregenden Quellen, angefangen beim Transport auf die Baustelle bis hin zu Erschütterungen aus dem Straßenverkehr, der Eisenbahn oder durch zuschlagende Türen und Fenster, auch die Ankoppelung des Bauteils an den Schwingungserreger weitgehend undefiniert bleibt. Die oft gestellte Frage, welche Belastung nun tatsächlich auf eine Dämmschicht wirkt und welche Einbaudichte zu einer ausreichenden Setzungssicherheit führt, kann daher nicht mit hinreichender Genauigkeit beantwortet werden. Ein Versuch, bei dem die Setzungsdichte an ausgebautem Material, welches im Laufe der Jahre Setzungserscheinungen gezeigt hat, mit der Setzungsdichte nach einer bestimmten Belastung im Labor verglichen wird, um daraus Anhaltswerte für die notwendige Belastungshöhe im Laborversuch zu gewinnen, findet sich in HEISEL et al. 2008. Angaben zu ausreichend volumenstabilen Einbringdichten werden dennoch zumeist auf der Basis über die Jahre der Baupraxis gesammelter Erfahrungswerte getroffen; so werden beispielsweise für den Einbau von Altpapierflocken in Abhängigkeit von der Gefachbreite, -tiefe und der Innenflächenrauigkeit der Gefache bestimmte Mindesteinbaudichten vorgeschrieben.

Schwingungsprobleme an Bauwerken, welche die Setzung von losen Dämmstoffen nach sich ziehen, werden in der Regel von dynamischen Lasten verursacht. Je nach zeitlichem Verlauf der Last unterscheidet man harmonische, periodische, transiente und impulsartige Lasten. Neben dem zeitlichen Verlauf sind weiter auch die Lastwechselzahl, die Beanspruchungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen des Lastmaximums sowie die Extremwerte charakteristische Größen, welche die Auswirkungen des Lastereignisses beeinflussen. (BACHMANN UND AMMANN 1987)

Grundsätzliche Bemerkungen zur Vorhersage von Erschütterungen im Bauwesen (DIN 4150-1) sowie zu deren Einwirkung auf Menschen (DIN 4150-2) und bauliche Anlagen (DIN 4150-3) finden sich in der Normung. In DIN 4150-1 sind Verfahren zur Ermittlung von Erschütterungen im Bauwesen und verschiedene Erschütterungsquellen beschrieben. Unterschieden wird zwischen Erschütterungen aus Einzelereignissen (Sprengungen, etc.), Anregungen aus dem Baubetrieb (Rammen, Rüttler, etc.), Anregungen aus dem Verkehr (Straßen-, Schienenverkehr) sowie Anregungen aus Maschinenbetrieb. Neben den Kriterien, welche die Quelle der Erschütterung selbst betreffen (Punktquelle, Linienquelle, harmonisch, stationär, Häufigkeit, Frequenzverteilung, etc.) ist vor allem auch die Anbindung des Gebäudes über den Untergrund entscheidend für die Übertragung der Erschütterungen in das Bauwerk hinein. In Abhängigkeit der Art des Untergrundes können für unterschiedliche Frequenzbereiche Übertragungswerte abgeschätzt werden. Exakte Lösungen müssen die Art des Untergrundes, die spezifischen Übertragungseigenschaften und die Energie je Frequenz berücksichtigen (GERASCH 1981). Bei der Weiterleitung der Erschütterungen im Gebäude selbst (vom Fundament in die Wände und weiter in die Zwischendecken) können Erschütterungen vor allem in Abhängigkeit der Deckenspannweiten verstärkt werden. In DIN 4150-3 finden sich Anhaltswerte zur Beurteilung der möglichen Schadenswirkung von Erschütterungen an Bauwerken. Die hierin angegebenen maximal zulässigen Schwinggeschwindigkeiten resultieren aus statischen Berechnungen auf Basis zulässiger maximaler Spannungen im Bauteil. Gebrauchswertminderungen im Sinne dieser Norm sind Beeinträchtigungen der Standsicherheit des Bauwerks sowie der Tragfähigkeit von Bauteilen (z. B. Decken) - diese Schadensformen werden als „Schäden“ bezeichnet;

außerdem die Bildung von Rissen in Wänden, Putz, etc. und das Ablösen von nichttragenden Zwischendecken - diese Schadensformen werden als „leichte Schäden“ bezeichnet. Eine Übertragung dieser maximalen Schwinggeschwindigkeiten als Kriterium für die Höhe der Erschütterungsbelastung bei der Prüfung von losen Dämmstoffen scheint deshalb nicht sinnvoll.

In SPLITTGERBER 1975 wurde an Gebäuden, die an Verkehrswegen mit großen Erschütterungen durch Straßen- und Schienenfahrzeuge liegen, Beschleunigungsmessungen an Geschossdecken durchgeführt. Die in den Gebäuden gemessenen Frequenzen lagen häufig in einem Bereich von 5 Hz bis 30 Hz. Hierbei ließen sich Schwinggeschwindigkeiten zwischen  $\sim 0,2 - 2,0$  mm/s messen. Übertragen auf eine Sinusschwingung ergibt sich bei diesen Schwinggeschwindigkeiten eine Beschleunigung von ca.  $1 \text{ m/s}^2$ .

Auf der Basis dieser Werte wurde von WEIßBACH 1985 eine Untersuchung zur Volumenbeständigkeit von losen Schüttungen als Wärmedämmstoffe im Bauwesen durchgeführt. Blähperlite und Polystyrol-Partikel wurden in unterschiedlichen Einbringdichten in eine zweischalige Wandkonstruktion eingefüllt, die auf einer federnd gelagerten Betonplatte aufgebaut war. Die Konstruktion wurde durch einen Unwuchtmotor mit 50 Hz zu Schwingungen angeregt. Beschleunigungen bis zu  $5 \text{ m/s}^2$  (entspricht ca.  $15 \text{ mm/s}$  Schwinggeschwindigkeit) führten bei ausreichender Vorverdichtung der Blähglaspartikel nicht zu Setzungserscheinungen. Eine beobachtete Setzung der Polystyrolkugeln führt WEIßBACH auf die Umlagerung der Kugeln zur dichtesten Kugelpackung zurück. Interessant ist in dieser Untersuchung auch die Messung des zeitlichen Verlaufs des Druckes auf die Wand im Zuge der Einbringung der Blähperlite und des anschließenden Vibrationsvorgangs. Dieser wurde gemessen, indem ein Stein der gemauerten Wandschale gegen einen Stahlkasten mit Druckaufnehmer ausgetauscht wurde. Während des manuellen Verdichtens des Materials konnten Drücke bis zu  $7 \text{ N/cm}^2$  gemessen werden. Während der weiteren Befüllung und nach Beendigung des Einfüllvorganges reduzierte sich der Druck von zunächst ca.  $0,15 \text{ N/cm}^2$  auf ca.  $0,11 \text{ N/cm}^2$ . Nach Beendigung der 70 min dauernden Vibrationsbeanspruchung waren nur noch ca.  $0,07 \text{ N/cm}^2$  Druck auf der Wand messbar.

Auch bei der Prüfung eines Hobelspäne-Wärmedämmstoffs auf das Setzmaß bei Einbau in einem 10 cm Wandzwischenraum bezieht sich KLOOS 1997 auf die von SPLITTGERBER 1975 ermittelten Maximalwerte der Erschütterungsimmissionen.

Eine Untersuchung zum Verhalten von losen Dämmstoffen in nachträglich verfülltem zweischaligem Mauerwerk mit Luftschicht an realisierten Bauobjekten im Alter von ca. 5 Jahren (WULKAN 1983) zeigt bezüglich der Setzungssicherheit der verbauten Materialien teilweise deutliche Mängel. Bei Dämmungen mit Polystyrolperlen wurden bei einer endoskopischen Inspektion örtliche Löcher in der Dämmschicht entdeckt. Die untersuchten Objekte mit einer Dämmung aus Perlitekörnern wiesen fast durchgehend erhebliche Setzungen von  $0,1 \text{ m} - 0,8 \text{ m}$  im oberen Teil der Wände auf. Inwieweit diese Setzung durch mangelnde Einbauqualität oder auch durch Auswehungen (WEIßBACH 1985) verursacht wurde, ist unklar.

Um beispielsweise bei der Produktion von Fertighauselementen, die mit werksmäßig ausgeführten Hobelspandämmungen versehen sind, der Separierung und Setzung entgegenzuwirken, werden heute über die Gefachhöhe verteilt Brücken aus nach oben hin bogenförmig vorgespannten Holzfaserhartplatten eingesetzt, welche das Eigengewicht der darauf aufliegenden Späne aufnehmen und so die weiter unten liegenden Dämmstoffschichten entlasten sollen (EIBER 2007). Auf diese Weise hergestellte Wandelemente mit den Gefachinnenmaßen  $2,30 \text{ m} \times 0,54 \text{ m} \times 0,19 \text{ m}$  wurden von CAMMERER et al. 2003 zwei unterschiedlichen Setzungsbeanspruchungen ausgesetzt. Die Prüfgefache wurden dabei an der Rückwand eines LKW Führerhauses montiert, um nach einer

bestimmten Anzahl gefahrener Kilometer die Setzung zu messen. Das Bauteil wurde auf diese Weise ca. 350 km auf Autobahnen und Landstraßen transportiert. Die Belastung simuliert hier den Transport des fertig gedämmten Bauteils zum Montageort. Zusätzlich zu der Belastung durch den LKW-Transport wurden die Gefache noch einer impulsartigen Belastung durch ein von außen linienförmig auf die Gefachwand auftreffendes Pendel ausgesetzt. Dieser Versuchsaufbau soll eine zuschlagende Türe simulieren und lehnt sich bezüglich der Höhe der eingetragenen Energie an die in DIN EN 1191 beschriebene Dauerfunktionsprüfung für Fenster und Türen an. Die kinetische Energie des Pendels simuliert im vorliegenden Fall eine Haustüre, die mit einer Masse von 60 kg und einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s in den Türrahmen schlägt. Die Setzungserscheinungen wurden erst nach dem Durchlaufen beider Testreihen, LKW und Pendeltest, gemessen. Bei der untersuchten Hobelspandämmung zeigte sich unterhalb der durch die Holzfaserverleimplatten gedrittelten Höhe eine Setzung von ca. 5 mm. Die durchschnittliche Dichte nach Versuchsende lag bei ca. 72 kg/m<sup>3</sup>.

Im Rahmen des Projektes Rosenheimer Haus (SCHWARZ 1999) wurde auch ein Langzeitversuch zur Ermittlung des Setzungsverhaltens der eingebrachten Hobelspandämmungen durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass der LKW-Transport der fertig gedämmten Bauteile vom Werk auf die Baustelle und die Montage der Bauteile wohl die größte Belastung darstellen, da alle Setzungen in der ersten Messreihe unmittelbar nach der Fertigstellung der Häuser beobachtet wurden. Sechs der zehn untersuchten Wandfelder wiesen hier Dämmstoffsetzungen zwischen 10 mm – 15 mm auf, wobei nur Wandfelder betroffen waren, in denen die Einbringdichte unter 60 kg/m<sup>3</sup> lag. Im Untersuchungszeitraum (drei Jahre) wurden keine weiteren Setzungserscheinungen festgestellt. Eine Separierung oder lokale Dichteunterschiede über der Wandelementhöhe konnten ebenfalls nicht beobachtet werden. Einschränkend muss natürlich festgehalten werden, dass es sich bei den untersuchten Wandelementen um Einbauten nicht bewohnter Experimentierhäuser handelte – eine Belastung durch Türen- oder Fensterschlagen, Trittschall u. ä. war also nicht vorhanden.

Eine Ermittlung der Setzung loser Schüttungen von Mineralfaserflocken und Altpapierflocken aus Tageszeitungspapier unter realistischen Einbaubedingungen wurde von SVENNERSTEDT 1986 in einem Langzeitversuch durchgeführt. In vier Testhäusern wurden im Dachboden Versuchsschüttungen unterschiedlicher Höhe eingebaut. Über einen Untersuchungszeitraum von drei Jahren wurde die Setzung durch manuelles Ablesen der Höhe an verschiedenen Messskalen in der Schüttung bestimmt. Die Schüttdichte der Altpapierflocken lag bei ca. 30 kg/m<sup>3</sup> – 45 kg/m<sup>3</sup>, die der Mineralfaserflocken bei ca. 16 kg/m<sup>3</sup> – 30 kg/m<sup>3</sup>. Nach 36 Monaten zeigten die Altpapierflocken eine Setzung von ca. 18 %, die Mineralfaserflocken erreichten eine mittlere Setzung von ca. 4,5 %. Die deutlich unterschiedlichen Ergebnisse wurden mit der größeren Faserlänge der verwendeten Mineralfasern erklärt.

Neben einer Setzung durch mechanische Beanspruchung der gedämmten Bauteile auf Grund von Erschütterungen können auch Beanspruchungen auf Grund von Materialfeuchteänderungen durch wechselnde Umgebungsklimata zu einer Setzung des Materials führen. Eine Auffeuchtung des Materials führt einerseits zu einer Erhöhung der Masse, die statische Belastung des Dämmstoffes durch das Eigengewicht der aufliegenden Materialschichten steigt also, andererseits bedingen Materialfeuchteänderungen auch Quell- und Schwindvorgänge, die auf interpartikulärer Ebene zu Verschiebungen der Partikel führen können. Weiter könnten sich in Abhängigkeit der Materialfeuchte auch Veränderungen in der Oberfläche der Partikel ergeben, die eine Setzung begünstigen. Bei Feldversuchen in Versuchshäusern oder mit realistischen Einbausituationen von Prüfgefachen werden stets beide Faktoren, d. h. eine mechanische Belastung der Bauteile durch Erschütterungen und hygroskopisch bedingte Setzungsphänomene zusammenspielen.

Bei der Bewertung eines Dämmstoffes bezüglich seiner Volumenstabilität muss man zwischen zwei Fällen unterscheiden. Sollen lediglich unterschiedliche Materialien miteinander verglichen werden, so ist die Belastung des Materials (in Form von Schwingungen oder impulsartigen Kraftstößen) möglichst reproduzierbar und für alle Materialien in der gleichen Intensität vorzunehmen. Die Ausformung der Probekörper muss hierbei nicht unbedingt der realen Einbausituation entsprechen, vielmehr sollte die Herstellung der Prüflinge möglichst einfach sein, um Fehler, die sich aus inhomogenen Proben oder falsch appliziertem Material ergeben können, auszuschließen.

Bei der Bewertung eines losen Dämmstoffes auf seine prinzipielle Praxistauglichkeit sind hingegen, vor allem was die Ausbildung der Probekörper betrifft, andere Faktoren zu berücksichtigen. Vorrangig spielt hier die Applikation des Materials in das Bauteil eine große Rolle. Gerade bei Einblasdämmungen hängt die Volumenstabilität in hohem Maße von der verwendeten Technik und der Erfahrung des ausführenden Fachmannes ab. Materialproben derselben Grundgesamtheit können bei identischer Belastung je nach Qualität der Applikation stabil bleiben oder Setzungserscheinungen zeigen (FENNIG 2007).

Bisher gibt es auf EU-Ebene noch keine genormten Verfahren zur Bestimmung eines Setzmaßes. Es existieren zwar Normentwürfe für an der Anwendungsstelle hergestellte Wärmedämmungen aus losen Dämmstoffen, beispielsweise das Dokument prEN 15101-1:2005, in dem Spezifikationen für Produkte aus Altpapierfasern hinterlegt sind – bezüglich der Volumenstabilität wird aber, wie auch in Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen, lediglich auf den ISO-Entwurf ISO/CD 18393 verwiesen. In dem Dokument mit dem Titel „Thermal insulation – Accelerated ageing of thermal insulation materials – Assessment of settlement of loose-fill thermal insulation used in attic and closed cavity applications“ werden Verfahren zur Beurteilung des Setzungsverhaltens von losen Dämmstoffen vorgestellt. Es werden vier Verfahren (method A – D) beschrieben, die für unterschiedliche Anwendungsfälle gelten. Methode A soll dabei die Einbausituation einer lose gestreut liegenden Zwischendeckendämmung abbilden. Die Lasteinleitung erfolgt über eine definierte Fallbewegung, was zuerst einer Fallbeschleunigung entspricht, der das Material mit einer gewissen Trägheit folgt und einem impulsartigen Kraftstoß am Ende der Fallstrecke. Methode B und C bilden die Einbausituation in einem geschlossenen Wandgefach ab. Die Belastung wird bei Methode B analog der Methode A vorgenommen, während das Gefach bei Methode C mit einem unwucherregten Rüttelmotor zu Sinusschwingungen angeregt wird. Die Höhe der am Gefach wirkenden Beschleunigung und die Dauer der Belastung sind in den Produktspezifikationen festgelegt oder werden zwischen Prüfinstitut und Hersteller vereinbart, wobei mindestens eine Beschleunigung von  $15 \text{ m/s}^2$  über eine Dauer von 30 min auf das Gefach einwirken soll. Bei Methode D sollen Setzungserscheinungen infolge klimatischer Schwankungen simuliert werden, was durch einen Klimawechsel von 23/50 auf 40/90 erfolgt. In allen Fällen wird das Setzmaß als Prozentangabe, bezogen auf die Dämmstoffhöhe nach der Belastung, angegeben. Als Nachweisverfahren zur Ermittlung der Setzung werden die Methoden A - D in verschiedenen Zulassungen vorgeschrieben. (u. a. DIBT 2003, DIBT 2007A, DIBT 2007B)

Die Brauchbarkeit der vorgeschlagenen Prüfmethode ist in erster Linie abhängig von dem verwendeten Material, weshalb auch keine allgemeingültige Anwendbarkeit auf alle losen Dämmstoffe vorgesehen werden kann. Beispielsweise führt die Anwendung der Methode A nach ISO/CD 18393 bei Hobelspänen zu unsinnigen Ergebnissen, da eher Auflockerungen des Materials und keine Setzungserscheinungen zu beobachten sind (EIBER 2007). Die Ausarbeitung produktspezifischer Anforderungen bleibt also in jedem Fall notwendig. In BÜHLMANN 2001 finden sich allgemeine Hinweise auf die Anforderungen an eine Prüfeinrichtung zur Bewertung des Einblas- und Setzungsverhaltens von losen Dämmstoffen.

In einigen älteren Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen ist zur Ermittlung der Setzung eine einfach durchzuführende Methode beschrieben, die im Prinzip der Methode A nach ISO/CD 18393 entspricht. Das Material wird in einen Lochblechkasten (Maße: 0,55 x 0,55 x 0,33 [m]) eingefüllt. Anschließend wird der Kasten über eine Seitenkante des Bodens um 10 cm angehoben und auf den harten Untergrund fallen gelassen. Der Versuch wird abwechselnd über die jeweils gegenüberliegenden Seiten wiederholt (10 x je Seite). Die Setzung wird gemessen, indem durch eine Öffnung in einem für die Kiste angefertigten Deckel mit einer Messnadel auf eine Prüfplatte (200 mm x 200 mm) gemessen wird, die einen Druck von  $50 \text{ N/m}^2$  auf das Material ausübt. Mit der gleichen Einbringung wird teilweise auch eine Bestimmung der Setzung unter verschärften Klimabedingungen durchgeführt. Hierbei wird der oben offene Behälter aus Lochblech für 7 Tage einem Klima 40/95 ausgesetzt. Die Setzung wird anschließend wieder mit Hilfe der Prüfplatte und einer Messnadel an fünf Stellen bestimmt. (u. a. DIBT 1997A, DIBT 1997B, DIBT 1997C, DIBT 1998, KLOOS 1997)

Mit dieser Methode wurde auch das Setzmaß in der Untersuchung von SCHEIDING UND DUBE 2001 bestimmt. Im Vergleich zu Altpapierfaserstoff erreichten die untersuchten Holzfasernstoffe schlechtere Setzmaße.

Eine weitere Methode, die Setzung lose geschütteten Materials durch Feuchtwechsel (40 % - 95 % r. F.) zu beurteilen, wird von SVENNERSTEDT 1988 vorgeschlagen. Das Material wird in einer Kiste mit einer Grundfläche von 600 mm x 600 mm in der vorgeschriebenen Höhe und Einbringdichte eingefüllt und zyklischen Klimawechseln unterworfen. Jede Feuchtstufe soll mindestens für 4 - 6 Wochen konstant gehalten werden. Insgesamt sind mindestens drei Feuchtwechsel bei konstanter Temperatur vorgesehen.

In der Arbeit von VOGEL wird die prinzipielle Eignung von Holz als Wärmedämmstoff untersucht. Dabei wurden für extrudierten Holzstoff, thermomechanischen Refinerstoff (TMP) sowie Säge- und Hobelspäne umfangreiche Reihenuntersuchungen durchgeführt, wobei ein zentraler Teil der Arbeit in der Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung des Setzungs- und Separationsverhaltens bestand. Ein vergleichbarer Prüfstand wurde auch zur Prüfung der Funktionssicherheit von Brandschutzeinrichtungen für Kernkraftwerke realisiert (HOSSER 1986). In der Arbeit von Vogel wird ein Prüfgefach mit 2,5 m Höhe und 1 m Breite auf einem Rüttelrost montiert, der über Spiralfedern mit dem Boden verbunden ist und durch einen unwuchterregten Rüttelmotor in Kreisschwingungen versetzt wird. Die entstehende Kreisschwingung kann dabei als Überlagerung zweier harmonischer Schwingungen in horizontaler und vertikaler Richtung verstanden werden. Während eines Prüflaufes wird ein Frequenzbereich von 10 – 80 Hz durchfahren (alle 10 Sekunden um 1 Hz erhöht), was über einen mit einer SPS-Steuerung regelbaren Frequenzumformer realisiert wird. Im Prinzip entspricht das Verfahren also der Methode C nach ISO/CD 18393 (wobei dort keine sukzessiv steigenden Frequenzen vorgesehen sind). An die Vibrationsversuche schließt sich noch eine Reihe von Fallversuchen an, in denen das Gefach aus einer Höhe von 10 cm frei fallen gelassen wird. Jede Versuchsreihe wurde fünfmal wiederholt, wobei als Anfangsdichte jedes Mal die Setzungsdichte aus dem Vorversuch gewählt wurde. (VOGEL et al. 1997, VOGEL et.al 1998b, VOGEL et.al 1998c, VOGEL 1999)

Bei allen untersuchten Materialien traten bezogen auf die Streudichte Setzungserscheinungen auf. Die geringste Volumenstabilität erreichte der TMP (253 % Setzungsdichte bezogen auf Streudichte als 100 %), gefolgt von Holzstoff (191 %), Hobelspänen (143 %) und Sägespänen (122 %). In einem anschließenden Dauerversuch mit einem in der Nähe eines Sägewerksgatters aufgestellten Prüfgefach erwiesen sich die im Versuch ermittelten Einbaudichten als unter den gegebenen Belastungen setzungssicher. Die lokalen Dichten nahmen während eines Versuchs über der Höhe des Gefaches von oben nach unten tendenziell zu, wobei die Variationskoeffizienten der

Dichteunterschiede mit steigenden Einbaudichten abnahmen. Die größten Unterschiede waren beim thermomechanischen Refinerstoff, die kleinsten bei den Sägespänen zu finden; Hobelspäne und extrudierter Holzstoff lagen dazwischen. Eine ausgeprägte Separierung des Materials war trotz zu beobachtender Teilchenbewegungen während des Versuchs nicht signifikant.

Mit der gleichen Vibrations- und Falleinrichtung und ähnlichem Versuchsprogramm wurden bei WEGENER et al. 2004 unterschiedlichste Hobelspansortimente und zwei Holzfaserstoffe untersucht. Hier zeigte sich, dass bei allen Materialien die deutlichsten Setzungen nach den Fallversuchen zu beobachten waren, was offensichtlich an der extrem hohen Bremsbeschleunigung beim Auftreffen auf den Boden lag. Hier konnten kurzfristig Werte von 200 - 250 g gemessen werden.

Das beiden Projekten zu Grunde liegende Versuchsprogramm stellt sicher eine Grenzbelastung für das Material dar und bietet deshalb ein großes Differenzierungspotential, wobei vor allem gegenüber der Vibrationsbelastung auch Vorbehalte formuliert werden müssen. Zum einen übersteigt die Gefachbreite deutlich die heute üblichen Maße, zum anderen kann das Prüfgefach nie ideal steif angebunden werden, wodurch Elastizitäten entstehen – sowohl in der Anbindung Tisch zu Gefach als auch im Gefach und über die Gefachhöhe selbst. Dies führt dazu, dass die Schwingungsbelastung über der Gefachhöhe und –breite, vor allem aufgrund der horizontalen Komponente der Kreisschwingung stark schwankt. Beispielsweise wurden bei einer Frequenz von 78 Hz an einer Stahlstütze seitlich des Wandbauteils Beschleunigungen bis zu 15 g gemessen, die aber vornehmlich elastischen Verformungen und überlagerten Eigenfrequenzen entspringen müssen, hält man sich vor Augen, dass der Rüttelrost bei vorgegebener Belastung nur ca. 3 g in das System einleitet, was dazu führt, dass entweder die Frequenzen oder die Schwingweiten der am Gefach wirkenden Schwingung mit den Erregergrößen nicht mehr übereinstimmen.

Darüber hinaus führen Streudichten von  $20 \text{ kg/m}^3$  (TMP) bis  $170 \text{ kg/m}^3$  (Sägespäne) bei einem Gefachvolumen von bis zu  $0,75 \text{ m}^3$  zu signifikanten Unterschieden in der dynamischen Masse. Anders ausgedrückt ist die Masse des eingebrachten Dämmstoffes in der Versuchseinrichtung, anders als am realen Gebäude, im Verhältnis zur Masse des gesamten schwingungsfähigen Systems, relativ groß. Dies führt bei gleicher Kraftereinleitung und vorgegebener Frequenz aber zu unterschiedlichen Beschleunigungen und verschobenen Eigenfrequenzen. Leichte Materialien werden dabei stärker beansprucht als schwerere, was bei der Herausstellung der Unterschiede in den ermittelten Setzungsdichten (die schwersten Materialien wiesen durchgängig die geringsten Setzungsmaße [%] auf) eigentlich berücksichtigt werden müsste.

Im Weiteren konnten bis zum letzten Versuch Setzungen ermittelt werden, was bedeutet, dass bei der durchgeführten Anzahl an Durchläufen kein Grenzwert der Setzung erreicht wurde. Gleichzeitig zeigten sich die Materialien im Dauerversuch setzungssicher.

Neben den im letzten Absatz formulierten Bedenken sind die Befüllung und das Handling des Prüfgefaches arbeits-, zeit- und materialintensiv. Eine Kurzprüfeinrichtung, die mit deutlich geringeren Mengen auskommt, wird seit etwa zehn Jahren vom Institut für Werkzeugmaschinen in Stuttgart erprobt. Hier wird das Material in einen Prüfzylinder aus Plexiglas eingebracht, mit einer Auflagerlast versehen und anschließend einer Schwingungsbelastung ausgesetzt. In der Arbeit von TRÖGER 2001 wird ein vergleichendes Schnellprüfverfahren beschrieben. Erwähnenswert ist das beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Einbringdichte vor Versuchsbeginn. Diese wird materialspezifisch aus der Rückstellung des Materials bei einer verringerten Auflagerlast ermittelt.

Ein anderer Kleinprüfstand, der aus einem Probenhalter besteht, welcher mit einem Exzentermotor zyklisch angehoben und anschließend 33 mm geführt auf eine harte Unterlage schlägt, wurde an der Fachhochschule Rosenheim entwickelt (MÜLLER-REINHOLZ UND WOEST 2004). Es wurde ein

logarithmischer Zusammenhang zwischen der Setzung in Prozent über steigender Einbringdichte ermittelt. Das Verfahren zeigte gute Korrelationen zu den parallel durchgeführten Großversuchen (WEGENER et al. 2004).

Daneben wird in der Literatur über eine Reihe anderer Prüfverfahren berichtet, die aber immer entweder auf impulsartigen Kraftstößen durch freien Fall, einer Einleitung von Sinusschwingungen oder durch eine Beaufschlagung der Prüfkörper mit wechselnden Klimata zur Einstellung alternierender Materialfeuchtebewegungen beruhen (u.a. SCHMIDT 1996, MEYR 2003).

### **3.1.3 Brandverhalten**

Nach der Musterbauordnung (MBO 2002) werden Baustoffe in drei Kategorien eingeteilt. Nicht brennbare, schwer entflammbar und normal entflammbar Baustoffe. Auch für Dämmstoffe gilt die in § 26 der MBO definierte Mindestanforderung der Normalentflammbarkeit als Mindestanforderung an Baustoffe. Das heißt, die Einordnung des Dämmstoffes in die Klasse B2 (DIN 4102-1) ist für die Zulassung des Bauproduktes zwingend notwendig. Besondere Anwendungen erfordern jedoch teilweise auch höhere Brandschutzklassifizierungen. So ist beispielsweise der Einsatz von Holz für tragende und aussteifende Teile bei fünfgeschossigen Gebäuden möglich, jedoch nur, wenn diese mit einer nichtbrennbaren Brandschutzbekleidung allseitig umschlossen sind und Dämmstoffe nicht brennbar sind. (FAMERS 2003)

Untersuchungen zur Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 von losen Dämmstoffen aus Hobelspänen wurden von STRENGE 1993 durchgeführt. Es wurden nicht imprägnierte Späne und Materialvarianten, die mit Soda und Molke imprägniert waren, in unterschiedlichen Einbringdichten und unterschiedlichen Spanfraktionen untersucht. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass eine höhere Einbringdichte die Brandschutzeigenschaften der Späne verbessert. Außerdem konnte gezeigt werden, dass auch die Imprägnierung mit Soda und Molke die Brandschutzeigenschaften verbessert.

In der Arbeit von VOGEL wurde nachgewiesen, dass auch unbehandelte Späne und Fasern aus Holz, die als Einzelpartikel eigentlich der Klasse B3 (leichtentflammbar) angehören, bei entsprechender Einbringdichte im Verbund die Einstufung in die Klasse B2 erreichen. Der Einfluss von Brandschutzsalzen auf die maximale Flammenhöhe zeigte sich besonders ausgeprägt bei Materialien geringer Dichte bzw. hoher spezifischer Oberfläche. Bei kompakten Sägespänen zeigte sich kein Einfluss des Flammschutzmittels. (VOGEL et.al 1998a, VOGEL 1999)

Auch bei WEGENER et al. 2004 wurde das Brandverhalten von unbehandelten Hobel- und Sägespänen untersucht. Eine Reihe von Materialien erreichte hier die Klassifizierung B2. Die Abhängigkeit der maximalen Flammenhöhe von der Einbringdichte wurde auch hier nachgewiesen. Im Weiteren wurden auch Untersuchungen zum Glimm- und Schwelverhalten der Materialien durchgeführt. Hierbei wurde ein Testverfahren nach ULC 1979 zur Bestimmung des Massenverlustes der Proben unter einer vorgeschriebenen Brandbelastung und der Glimmneigung der Proben angewendet. Die festgestellten Massenverluste unterschieden sich zum Teil deutlich. In der gleichen Arbeit finden sich auch Angaben zu Bauteilversuchen mit Holzrahmenelementen in einem Wandprüfstand, die mit unterschiedlichen losen Dämmstoffen befüllt waren.

Es existieren zahlreiche Untersuchungen, die sich mit der Entwicklung und Bewertung von Prüfverfahren hinsichtlich des Brandverhaltens, auch bezüglich des Schwel- und Glimmverhaltens, beschäftigen (z. B. HÖLEMANN 1984, HÖLEMANN 1997, BOCK UND KLEMENT 1998).

Neben den beschriebenen Brandschutzmitteln wie Soda und Molke oder Ammoniumsulfaten, Borsalzen, etc. gibt es auch Ansätze, die Brandschutzeigenschaften von Spänen durch die



Beaufschlagung der Partikel mit Lehm oder Zement zu verbessern. Die Baustoffklasse B2 wird mit dieser Modifikation erreicht. (DIBT 1997a, DIBT 2006)

### 3.1.4 Hygroskopisches Verhalten

Das feuchtetechnische Verhalten hygroskopischer Materialien lässt sich auf unterschiedliche Weise beschreiben. Kenntnisse über die Materialfeuchte unter gegebenen Randbedingungen sind wichtig, um das Verhalten anderer mit der Materialfeuchte verknüpfter Kennwerte zu prognostizieren und so abschätzen zu können, ob die Funktion des Baustoffs unter den zu erwartenden Randbedingungen in ausreichendem Maße erfüllt werden kann.

Bei gegebener relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur stellt sich in hygroskopischen Materialien eine diesen Umgebungsfaktoren gesetzmäßig zugeordnete Materialfeuchte ein, die als Gleichgewichtsfeuchte oder Ausgleichsfeuchte bezeichnet wird (SEIFERT 1972). Eine Darstellung der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur bezeichnet man als Sorptionsisotherme. Experimentell ermittelte Isothermen können nach IUPAC (SING ET.AL. 1984) in sechs Typenklassen unterteilt werden. Bei Holz stellt sich eine charakteristische Typ II - Isotherme (s-förmiger Verlauf) ein (Abbildung 3-2).

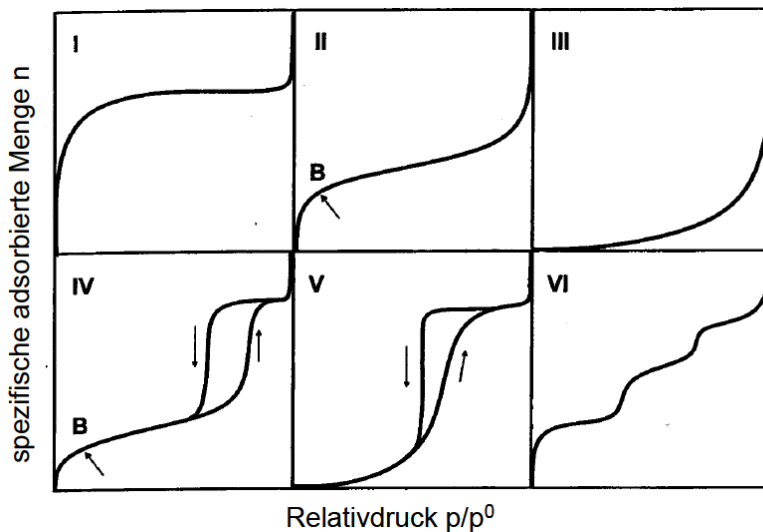


Abbildung 3-2 Verlauf experimentell ermittelter Isothermen nach IUPAC

Die reversible Typ II - Isotherme ist die Standardform einer Isotherme bei nicht- oder grobporigem Material und ist bei Ein- und Mehrschicht Adsorption gültig. Der eingezeichnete Punkt B kennzeichnet den Zustand, ab dem die monomolekulare Sorption (Chemosorption) abgeschlossen ist. Bei weiter steigender relativer Luftfeuchtigkeit beginnt die Adsorption weiterer Lagen, wobei der Übergang von der Monolage zur Adsorption mehrerer Schichten schwierig zu bestimmen ist. Im Bereich hoher r. F.n kommt es zu einem steilen Anstieg der Isotherme. In diesem Bereich setzt eine Kapillarkondensation ein. Bei Holz ist im Weiteren eine ausgeprägte Hysterese zwischen Adsorption und Desorption zu beobachten. Bei der Desorption werden höhere Ausgleichsfeuchten (bei gleicher relativer Luftfeuchtigkeit) als bei der Adsorption gemessen. Der Versuch, die Hysterese bei Holz umfassend und physikalisch exakt zu erklären, ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. (u. a. KOLLMANN 1959, KOLLMANN 1963, MERSMANN et al. 2005)

Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Methoden zur Bestimmung der Sorptionsisothermen von Holz und Holzwerkstoffen (u. a. KOLLMANN UND SCHNEIDER 1958, KOLLMANN 1959, SCHNEIDER 1960). Grundlegende Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen, auch unter bestimmten Vorbehandlungen, finden sich u. a. in NOACK 1959,

KOLLMANN UND SCHNEIDER 1964, ENGELHARDT 1973, SCHNEIDER 1978, WEICHERT 1963, SEIFERT 1972, BÖHNER 1996. Eine systematische Bestimmung der Sorptionsisothermen unterschiedlicher Dämmstoffe findet sich in SCHOLZ 2000. Neben der experimentellen Bestimmung der Sorptionsisothermen existieren zahlreiche analytische Ansätze, den Adsorptionsprozess aufgrund unterschiedlicher Sorptionstheorien zu beschreiben (u. a. NELSON 1982, BJÖRK UND RASMUSSEN 1995, CHEN UND LAMB 2002). Eine systematische Erfassung der relevanten Literatur sowie ein qualitativer Vergleich der zahlreichen Sorptionstheorien und Ansätze findet sich in FORTUIN 2003.

Neben einer Beschreibung der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte ist unter bauphysikalischen Gesichtspunkten die Wasserdampfdiffusion ein entscheidender Materialkennwert. Untersuchungen zum Diffusionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen finden sich u. a. in CAMMERER 1970, KÜNZEL UND KIEßL 1990, GANEV 2003, POPPER et al. 2004, POPPER et al. 2005, Foglia et. al 2006, SONDEREGGER UND NIEMZ 2009.

Um in Bauteilen wirkende Feuchtigkeitsbewegungen zu simulieren wurden auf Basis unterschiedlicher Stoffkenngrößen Rechenansätze entwickelt, die es erlauben, Diffusionsvorgänge in Bauteilen in Abhängigkeit beliebiger Klima- und Nutzungsszenarien zu simulieren. (u. a. KLOPPER 1983, KIEßL UND MÖLLER 1989a, KIEßL UND MÖLLER 1989b, KIEßL et al. 1993, VÖLKNER 2003)

Zur Beurteilung des feuchtetechnischen Verhaltens von hygrokopischen Dämmstoffen wurden unterschiedliche praxisnahe Prüfungen entwickelt. So wurde beispielsweise das Austrocknungsverhalten von nass eingebauten Massivhölzern als Ständer in einem Wandgefach, die von unterschiedlichen Dämmstoffen umschlossen sind, untersucht (HERLYN UND MEHLHORN 1998, HERLYN 2000, VOGEL et al. 2002). Durch die gute Aufnahme der aus dem Holz abgegebenen Feuchtigkeit und der Speicherung im Dämmstoff entsteht die Gefahr einer erneuten Aufwechung des Holzelementes. Hoch feuchtespeicherfähige Materialien in dampfdiffusionsdichten Querschnitten können demnach die Trocknung von Hölzern mit hohen Einbaufeuchten so lange verzögern, dass schließlich die Gefahr des Pilzbefalls besteht. In dieser Konsequenz sollten möglichst diffusionsoffene Konstruktionen gewählt werden (HERLYN UND MEHLHORN 1998). In anderen Untersuchungen konnte kein signifikanter Unterschied im Austrocknungsverhalten der Prüfhölzer zwischen Dämmstoffen auf mineralischer Rohstoffbasis und aus nachwachsenden Rohstoffen mit entsprechend höherem Feuchtespeichervermögen nachgewiesen werden (HERLYN 2000).

### **3.1.5 Materialcharakterisierung disperser Systeme**

Bei allen losen Dämmstoffen handelt es sich um eine Anhäufung unterschiedlich ausgeformter Partikel. Man kann einen losen Dämmstoff demzufolge als disperses System betrachten, das sich über die Morphologie seiner Partikel und deren räumlicher Zuordnung zueinander beschreiben lässt. Wissenschaftlich gesehen lässt sich die Charakterisierung von losen Dämmstoffen gleich welchen Materials also dem Gebiet der Dispersitätsanalyse zuordnen.

Die Begrifflichkeiten beim Messen disperser Systeme werden in der DIN 66160 geregelt. Ein disperses System liegt demnach vor, wenn wenigstens eine disperse Phase (also aus abgrenzbaren verstreut vorliegenden Elementen zusammengesetzte Materie) und ein umgebendes Medium (die zusammenhängende Phase des dispersen Systems) vorliegen. Übertragen auf ein loses Dämmmaterial bilden also die Späne oder Fasern die disperse Phase, während die im System eingeschlossene Luft das umgebende Medium darstellt.

Da sich die einzelnen Spanpartikel in der Regel gegenseitig berühren, kann man lose Dämmstoffe im Weiteren als kohärent-disperses System spezifizieren. Ein lockeres kohärent-disperses System mit fester disperser Phase und gasförmigem umgebendem Medium kann dabei im Weiteren auch als Haufwerk bezeichnet werden, welches neben Primärpartikeln (einzelner Partikel, der nicht durch

Zusammenlagerung mehrerer Partikel entstanden ist) auch Agglomerate (Feststoffpartikel, die aus mehreren Partikeln zusammengesetzt sind) enthalten kann.

Weitere Einteilungen disperser Systeme, die für eine Charakterisierung von losen Dämmstoffen nützlich sind, können nach folgenden Definitionen erfolgen.

Eine Einteilung nach dem Grad der Feinheit der beteiligten Partikel (hier definiert über die im Wesentlichen vorliegende Länge der Primärteilchen) führt zu einer Einteilung der hier behandelten Span- und Fasersortimente als grobdisperses System (Partikellänge > 100 µm).

Weisen alle in einem System vorhandenen Elemente das gleiche Partikelmerkmal auf, so spricht man von monodispersen Systemen. Der Begriff polydispers kennzeichnet hingegen disperse Systeme, deren Partikel unterschiedliche Merkmale aufweisen. (DIN 66160)

Ein aus Frässpänen einheitlicher Holzart aufgebauter loser Dämmstoff kann also beispielsweise hinsichtlich der Rohdichte seiner Partikel als monodispers bezeichnet werden, während es sich, unterschieden nach der Partikelgrößenverteilung, der sogenannten Körnung, um ein polydisperses System handelt.

Eine Charakterisierung im Sinne einer Dispersitätsanalyse erfolgt sinnvollerweise über die Messung der Feinheit des dispersen Systems. Hierzu stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die im Prinzip alle der mechanischen Verfahrenstechnik zuzuordnen sind. Zu den bekanntesten mechanischen Analyseverfahren, die eine Klassierung von Partikelkollektiven durch Trennung ermöglichen, zählen die Siebanalyse, die Sichtanalyse und die Sedimentationsanalyse. Die Siebanalyse ist das wohl etablierteste Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Erläuterungen zur Durchführung finden sich in Punkt 4.2.1.3. Daneben existieren auch Verfahren, die ohne vorherige Trennung des Systems Aussagen über den Dispersitätsgrad des betrachteten Systems zulassen. Eine Errechnung der Partikelflächen kann beispielsweise bei optischen oder elektronenmikroskopischen Aufnahmen von Partikelkollektiven über die Auswertung von hell/dunkel Kontrasten erfolgen. Optische Einzelpartikelzähler in Form von Streulichtzählern nutzen dagegen Beugungs-, Brechungs- und Reflexionserscheinungen an mit Licht definierter Wellenlänge angestrahlten Proben. Extinktionszähler erfassen die direkte Projektionsfläche der Einzelpartikel und basieren auf dem Effekt der Abschattung eines durch die Probe hindurchgeleiteten Lichtstrahls. Laserscanner benutzen einen rotierenden Laserstrahl, um die Dauer des Schattenwurfes beim Überstreichen der Partikel auszuwerten und eine Längenverteilung zu erhalten, die den Feinheitsgrad des Systems repräsentiert. Beim Einsatz eines Laserbeugungsspektrometers wird die charakteristische Streulichtverteilung, die von der Partikelgröße abhängt, gemessen und ausgewertet (ALEX 2007).

Alle Verfahren haben für individuelle Anwendungsfälle ausgeprägte Vor- und Nachteile, die in der Literatur entsprechend diskutiert werden. Eine generelle Empfehlung, welche Messtechnik für welches System in Frage kommt, ist wohl auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit nicht zu treffen. Mit Systemen, bei denen die Partikel an einer Kamera vorbeifallen, können beispielsweise kubische bis längliche Partikel gut abgebildet werden. Flächige Spangeometrien werden dagegen, je nachdem wie der Partikel zur Kamera fällt, entweder von der Schmalseite stiftförmig oder von vorne flächig erfasst. Zusätzliche Schwierigkeiten ergeben sich, wenn die Spanfläche mehrachsig verdreht vorliegt. Für relativ kompakte Spanformen, wie diese zur Herstellung von Spanplatten eingesetzt werden, lassen sich mit digitaler Bildverarbeitung über die Bildung von Formfaktoren, z. B. Länge zu Breite, brauchbare Analysen erstellen (ARNOLD 1986). In einem erweiterten Anwendungsfeld der optischen Partikelgrößenerfassung zur Qualitätskontrolle an repräsentativen Proben erlauben Online-Partikelgrößenanalysen die kontinuierliche Erfassung der Korngrößen im Produktionsprozess

(COPPERS UND SCHÜTZ 2005). Auch hier ist aber der messbare Korngrößenbereich, der beispielsweise 0,2 mm - 20 mm betragen kann, beschränkt und die Probleme bei der Erfassung der korrekten Form des Partikels bleiben bestehen.

Neben den genannten Möglichkeiten zur Klassierung von Partikelkollektiven in Merkmalsgruppen gibt es auch genormte Verfahren zur Bestimmung der Oberfläche. Diese arbeiten entweder auf Basis eines Durchströmungsverfahrens (DIN 66126) – hier wird bei konstantem Volumenstrom der Druckabfall an dem porösen System gemessen, oder die Messung erfolgt auf der Grundlage von Gasadsorptionsverfahren. Letztere erfassen neben der äußeren auch die innere Oberfläche der Partikel, beispielsweise in Form von Poren, während das Durchströmungsverfahren stets nur die äußere Oberfläche erfasst.

Da nur in den wenigsten Fällen geometrisch klar definierte Partikelgeometrien vorliegen werden, ist es unabdingbar, sich bei der Angabe von Messergebnissen auf einheitliche Durchmesserdefinitionen zu beziehen, die dem jeweiligen Bedarfsfall angepasst sind. Hierzu bedient man sich oft sogenannter Äquivalentdurchmesser, die das unregelmäßig geformte Element auf den Durchmesser einer Kugel beziehen, die unter gleichen physikalischen Bedingungen dasselbe Merkmal aufweist, wie der tatsächlich vorliegende Partikel. Eine Definition möglicher Äquivalentdurchmesser findet sich in DIN 66160. Die Übertragung auf meist ein- oder mehrschsig gekrümmte Spanflächen ist ohne eine adäquate optische Erfassung dieser Flächen allerdings nicht möglich.

Die wichtigste Voraussetzung für eine korrekte Erfassung der Materialstruktur ist bei allen beschriebenen Analyseverfahren eine sorgfältige Probenteilung zur Herstellung repräsentativer Teilmengen der Grundgesamtheit. Analytisch exakte Methoden zur Probenteilung sind je nach Feinheit und vorliegender Menge der Grundgesamtheit mehr oder weniger praktikabel. Die Teilung von Proben mittels Drehteller oder Riffelteller ist bei kleineren Probenmengen möglich, aber je nach Materialstruktur, beispielsweise einer eingeschränkten Rieselfähigkeit bei großen flächigen Spänen oder bei zu Agglomeration neigenden Faserstoffen, schwierig. Als für Span- und Fasermaterialien gleichermaßen geeignetes Verfahren, welches unkompliziert in der Durchführung ist, wird oft die Methode des Kegeln und Viertelns angewendet. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich in Punkt 4.2.1.1 .

### **3.1.6 Kompositdämmstoffe – Feststoffmischen**

Bei der Herstellung von losen Dämmstoffen aus unterschiedlichen Materialsortimenten ist für jede angestrebte Materialkombination die prinzipielle Mischbarkeit zu überprüfen bzw. die erreichbare Mischgüte zu bestimmen. Eigenschaften, die im Kleinversuch erreicht wurden, können nur dann vorteilhaft in Wirkung treten, wenn sich über die gesamte Wandfläche hinweg eine möglichst homogene Verteilung der beteiligten Partikel einstellen lässt. Kommt es während des Mischvorganges selbst, bei der Einbringung in das Gefach oder im Verlauf der Nutzung zu Entmischungen, so können sich die in Wechselwirkung stehenden und wie beschrieben auf die Materialkomponenten verteilten Funktionen nicht in der vorgesehenen Weise entfalten – das heißt, die angestrebte gegenseitige Unterstützung der Dämmstoff-komponenten entfällt. Entmischungen durch Schwingungsbeanspruchungen während der Montage oder Einbringung sowie der Nutzung können mit den beschriebenen Setzungsversuchen festgestellt werden. Die Voraussetzung hierfür ist aber eine beschreibbare Mischgüte nach dem Mischvorgang.

Der Mischvorgang lässt sich als eine verschiebende Bewegung zwischen den Ausgangsstoffen im Mischraum verstehen, die zu einer Neuordnung von Teil- oder Elementarbereichen der zu vermischenden Substanz führt. Der Mischungszustand ist während der Mischzeit veränderlich und kann drei theoretische Zustände einnehmen. Bei der vollständigen Entmischung sind die zu

mischenden Komponenten räumlich exakt getrennt. Die ideale Homogenität kennzeichnet den gegenteiligen Zustand; es sind alle Komponenten in jeder Probe der Grundgesamtheit ideal gemischt. Das heißt jede Probe spiegelt in ihrer Zusammensetzung exakt die Mengenverhältnisse der Grundgesamtheit wieder. Eine ideale Homogenität stellt sich dabei nie zufällig ein, sondern kann nur durch eine bewusste Anordnung erreicht werden. Zwischen diesen beiden Extremen liegt die gleichmäßige Zufallsmischung, die als praktisch günstigste erreichbare Mischgüte zu verstehen ist. Reale Mischungsvorgänge werden also immer zwischen der vollständigen Entmischung und der gleichmäßigen Zufallsmischung liegen. (SCHWISTER 2007, STIEß 2009)

Wie beschrieben ist der Mischungszustand über der Mischzeit veränderlich, wobei bei Überschreiten der optimalen Mischzeit auch wieder Entmischungsvorgänge auftreten können. Es ist also theoretisch erforderlich, für jede Materialkombination die optimale Mischzeit zu bestimmen. Die Bestimmung der Mischgüte in ihrem Verlauf über der Mischzeit erfolgt über den Vergleich der Zusammensetzung einer Probe mit der Zusammensetzung der Grundgesamtheit. Je kleiner die Varianz der Partikelverteilung zwischen den Proben und je näher die Mittelwerte der Probenzusammensetzung an der Grundgesamtheit liegen, umso besser ist die Mischgüte. Die Probennahme folgt den Regeln der zufälligen Probenziehung und Teilung. Die Probengröße muss dabei mindestens so groß sein, dass jede Komponente der Mischung in ausreichend großer Zahl repräsentiert wird. Um die Probenanalyse bei polydispersen Systemen zu vereinfachen, empfiehlt es sich, die Betrachtung des Gemischs auf zwei Komponenten zu reduzieren. Der Anteil einer relevanten Komponente A wird dabei im Verhältnis zu den restlichen Komponenten B betrachtet. (SCHWISTER 2007, UVT 2007)

Feststoffmischer existieren heute in den unterschiedlichsten Formen. Man unterscheidet zwischen Mischern mit rotierendem Behälter und/oder rotierendem Mischwerkzeug sowie Schwerkraft- und pneumatischen Mischern und mischenden Lagerverfahren. Allen Verfahren ist dabei folgendes Grundprinzip gemein. Nach einer Auflockerung des Materials soll ein gegenseitiges Verschieben von Korngruppen und Teilchen herbeigeführt werden, mit dem Ziel, die unterschiedlichen Elemente nebeneinander zu positionieren.

## **3.2 Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe**

In der Vergangenheit wurden die unterschiedlichsten Dämmstoffsysteme entwickelt. Die Rohstoffbasis wird bis heute ständig erweitert, was vor allem durch die Nutzung alternativer und natürlicher Materialien Chancen bietet, aber auch Schwierigkeiten in der Anwendung mit sich bringt. Dabei sind mit der Entscheidung für ein Dämmstoffkonzept auch viele konstruktive Entscheidungen verknüpft, die dazu führen, dass das Material sinnvollerweise nie losgelöst von der Anwendungstechnik betrachtet werden kann. Das nachfolgende Kapitel soll einen Überblick über die Einteilung von Dämmstoffen geben.

### **3.2.1 Einteilung von Dämmstoffen**

Nach der Festlegung des prinzipiellen Dämmkonzeptes, beispielsweise der Entscheidung für Außen-, Innen- oder Zwischendämmung und den damit verbundenen konstruktiven Überlegungen zur baulichen Ausführung, sieht man sich in der Regel mit einem breiten Spektrum an möglichen Dämmstoffmaterialien konfrontiert. Zwar sind nicht alle Rohstoffe gleichermaßen für alle Dämmkonzepte geeignet – dennoch sollte es in fast allen Fällen möglich sein, sich zwischen unterschiedlichen Materialien zu entscheiden. Das Spektrum derzeit angebotener Dämmstoffe erscheint dabei in jedem Fall unübersichtlich. Eine Einteilung nach unterscheidbaren Kriterien schafft eine sinnvolle Ordnung.

Dämmstoffe können dabei nach ihrer Lieferform (Matten – gebunden / Schüttung - lose), ihrem chemischen Aufbau (organisch / anorganisch), ihrer Herkunft (natürlich / synthetisch) oder ihrem Verwendungszweck (Wärmedämmung, Schalldämmung, Trittschalldämmung, etc.) unterschieden werden. Eine andere Gliederung ergibt sich, wenn die Abgrenzung über eine Unterscheidung zwischen Schaumstoffen und Faserdämmstoffen vorgenommen wird (vgl. LEHMANN 2004A; AUTORENKOLLEKTIV 2003). Einen Überblick über das Materialspektrum und eine mögliche Einteilung nach Materialgruppen und Aufbereitung gibt Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1 Mögliche Einteilung von Dämmstoffen in Abhängigkeit von Materialgruppe und Aufbereitung (in Anlehnung an ANONYMUS 2002)

Materialgruppe	Matten/Filze	Platten	Schüttungen
Mineralische Dämmstoffe		Perlite Schaumglas Kalzium-Silikat Mineralschaum	Perlite Glimmerschiefer Blähglas-Granulat
Mineralisch-Synthetische Dämmstoffe	Mineralfasern	Mineralfasern	Mineralfaserflocken
Synthetische Dämmstoffe	Polyester	Polystyrol (EPS/XPS) Polyurethan- Hartschaum (PUR)	
Pflanzliche Dämmstoffe	Flachs Hanf Kokosfasern Baumwolle	Holzfasern Kork Schilf Altpapier	Altpapier Kork Baumwolle Holzspäne Holzfasern
Tierische Dämmstoffe	Schafwolle		Schafwolle

Eine interessante Idee zur Verarbeitung loser Schüttungen wird in HESCH UND HESCH 1996 beschrieben. Um die Verarbeitbarkeit loser Schüttungen zu vereinfachen, sollen die Partikel in Papierverpackungen eingebracht werden, die anschließend wie gebundene Matten eingebaut werden können. Das Produkt nimmt also eine Art Zwischenstellung zwischen den Verarbeitungsformen Platten/Matten und Schüttungen ein.

Weiter kann die Frage der Einteilung natürlich auch aus Imagegründen sowie einer vermarktungstechnischen Abgrenzung verschiedener Produktgruppen untereinander erfolgen. So ist eine Unterscheidung mit der Beschränkung auf die Herausstellung des Unterschiedes zwischen natürlichen und sogenannten traditionellen Dämmstoffen im Sprachgebrauch weit verbreitet. Diese Merkmale wurden während eines inzwischen ausgelaufenen Förderprogramms des BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) in den Jahren 2003 – 2007, das zum Ziel hatte, die Vermarktung von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe anzukurbeln, eingeführt und werden seitdem von vielen Unternehmen werbewirksam eingesetzt.

### 3.2.2 Einsatz von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro) werden meistens in Konkurrenz zu traditionellen Materialien angeboten. Mit einem fundierten Wissen um die spezifischen Materialeigenschaften können alternative Dämmstoffe heute in vielen Bereichen eingesetzt werden (Abbildung 3-3).

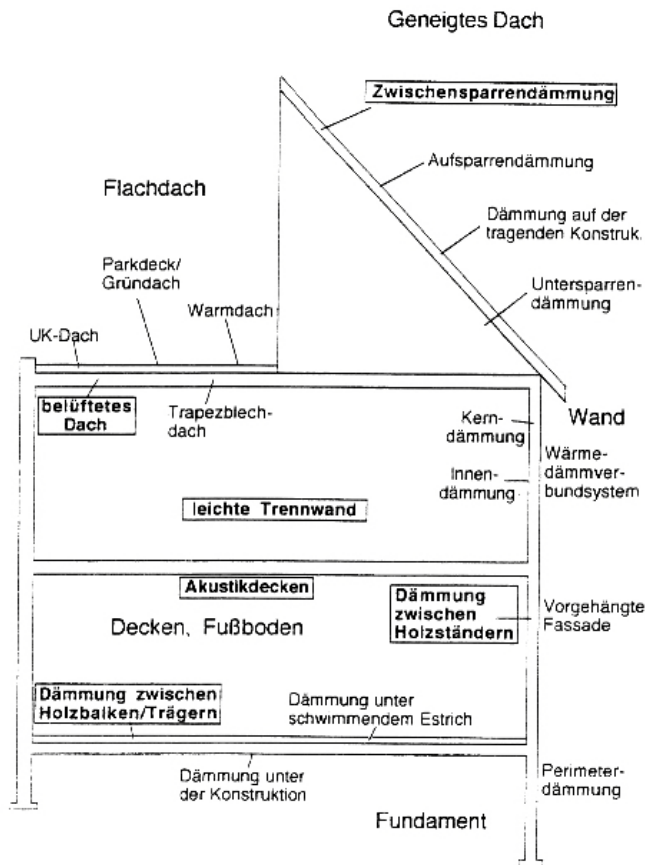


Abbildung 3-3 Anwendungsgebiete von Dämmstoffen in Gebäuden, alternative Dämmstoffe: fett und umrahmt (Darstellung aus: ALBRECHT 1997)

Gegenüber herkömmlichen Produkten, die im Bereich der Dämmstoffe entweder aus anorganischen Materialien wie Mineralfasern, Blähton, u. a. oder organisch synthetischen Rohstoffen bestehen, bieten Nawaros den Vorteil gut recycel- und kompostierbar zu sein und darüber hinaus einen CO<sub>2</sub>-neutralen Lebenszyklus aufzuweisen. Dies bedeutet, dass bei einer an die stoffliche Nutzungsdauer anschließenden thermischen Verwertung des Produktes nicht mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, als im Laufe des Wachstums der pflanzlichen Rohstoffe aus der Atmosphäre gebunden wurde (u. a. BUSCHMANN 2003, HEINRICH UND HERING 2003, HEINRICH UND HERING 2004). Im Gegensatz dazu werden bei der Nutzung und Verbrennung von fossilen Rohstoffen wie Erdöl und Erdgas große Mengen an CO<sub>2</sub> freigesetzt, die nicht zeitnah aus der Atmosphäre entnommen wurden.

Im Weiteren wird in der Produktbezeichnung "nachwachsend" bereits ein weiterer Vorteil dieser Materialien genannt. Im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen, die aus organischem Material bestehen, das vor Millionen von Jahren in das Erdreich eingelagert wurde und einem entsprechend lang andauernden Umwandlungsprozess entstammt, sind Nawaros mit verhältnismäßig kurzen Umtriebszeiten von teilweise nur wenigen Jahren (bei Einjahrespflanzen innerhalb Jahresfrist) nachwachsend. Der limitierende Faktor, den Einsatz betreffend, besteht hier also nicht mehr in der Endlichkeit vorhandener Lagerstätten, sondern in der Verfügbarkeit geeigneter Anbauflächen. EICKE-HENNIG 1997 schreibt, dass die für die erforderliche Vergrößerung des Dämmstoffmarktes nötige Verfügbarkeit von Pflanzenfasern nicht ausreicht. Dem entgegen stehen bislang ungenutzte Rohstoffpotentiale, deren Ausnutzung auch aus Naturschutzinteressen vorangetrieben werden sollte. So läuft aktuell von der EU finanziert ein Projekt zur Förderung des Korkeinsatzes, um die in ihrem Bestand gefährdeten Korkeichenwälder in Portugal durch die Nutzung der Rinde wirtschaftlich zu machen und somit zu erhalten (ANONYMUS 2010).

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Fragestellung, welches Substitutionspotential ein Dämmstoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe bieten kann. Hierbei wird, bezogen auf die Einbaudichte der Matten oder Streuungen, unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit des Materials und der Massenverfügbarkeit (nutzbare Zuwachsmengen), die maximal zu substituierende Menge an Mineralfaserdämmstoffen angegeben. In einer Untersuchung von MURPHY 1998 wird interessanterweise Hanffasern das größte Substitutionspotential attestiert, obwohl Hanf im Vergleich mit anderen Faserprodukten eher weniger gute Dämmeigenschaften aufweist. Diese Feststellung ist dabei auf den vergleichsweise hohen Faserertrag von Hanf ( $2500 \text{ kg}_{\text{Fasern}}/\text{ha}_{\text{Anbaufläche}}$ ) im Vergleich zu Flachs ( $1750 \text{ kg}_{\text{Fasern}}/\text{ha}_{\text{Anbaufläche}}$ ) und dem zusätzlich zu berücksichtigenden Potential der bisher weitgehend ungenutzten Schäben zurückzuführen. Unter Berücksichtigung der Zahlen von 1998 ist Hanf damit das einzige Material, welches mehr als  $100 \text{ m}^3$  Mineralwolle (gerechnet mit  $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) je Hektar Anbaufläche substituieren kann. Im Vergleich dazu wird das Substitutionspotential der Anbaufläche Wald aufgrund der, bezogen auf die Anbaufläche, verhältnismäßig geringen Biomassezuwächse schwächer eingeschätzt. (MURPHY 1998)

Ein weiterer Aspekt, der für den verstärkten Einsatz natürlicher Baustoffe spricht, ist die Frage nach der gesundheitlichen Unbedenklichkeit der eingesetzten Materialien. Auch wenn ein fachgerecht eingebautes Bauprodukt für den Nutzer unbedenklich ist, so kann doch für den Verarbeiter und Monteur eine Gefährdung durch ungenügenden Arbeitsschutz entstehen. Beispielsweise ist die Lungengängigkeit von Mineralfaserprodukten immer wieder ein Thema kontrovers geführter Diskussionen. Natürliche Materialien können Vorteile bieten, wenn beispielsweise durch die Ausnutzung natürlicher Bindekräfte des Materials, wie bei bestimmten Holzfaserdämmplatten, auf die Zugabe weiterer Bindemittel (meist in Form von formaldehydhaltigen Kunstharzen) verzichtet werden kann. In neueren Entwicklungen werden inzwischen auch Dämmplatten aus Holzfasern hergestellt, die mit Lehm gebunden werden (ANONYMUS 2006c). Auch der Einsatz von Schilf als Baumaterial, und hier auch zur Dämmung, wird seit Jahrhunderten praktiziert und geht nachweislich bis in die Jungsteinzeit zurück. In HOLZMANN 2006 werden die Vor- und Nachteile des Einsatzes von Schilfrohr in Wärmedämmverbundsystemen beschrieben.

Innerhalb geschlossener Stoffkreisläufe spielen natürlich auch die Transportwege eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Ökobilanz eines Werkstoffes. Hier kann beispielsweise die Nutzung von Nebenerzeugnissen wie Spänen und Fasern, die innerhalb des Produktionsprozesses eines Fertighausherstellers sowieso anfallen, als Dämmmaterial Vorteile bieten, da lange Transportwege, die bei Dämmstoffen mit einem geringen Schüttgewicht ohnehin eine ungünstige Kapazitätsausnutzung bedingen, wegfallen oder über Standleitungen benachbarter Unternehmen, die einen Industriecluster bilden, erfolgen können.

Da unter Architekten und Bauherren immer noch ein eher zaghaftes Interesse daran besteht, Nawaros einzusetzen, gibt es Förderinitiativen des Bundes, die durch entsprechende Zuschüsse und Imagekampagnen die Absatzzahlen dieser Materialien anheben sollen. Im Bereich der Dämmstoffe unternimmt unter anderem die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) Anstrengungen, das Verständnis für den sinnvollen Einsatz von Nawaros in den unterschiedlichsten Bereichen, also von energetischer bis stofflicher Nutzung, zu fördern. Die FNR fungiert dabei als Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

Entlang des Entstehungsprozesses eines einsatzfähigen Baustoffes, also dem Weg vom Rohstoff zum fertigen Produkt, sind aber auch bei Nawaros unterschiedliche technische Aufbereitungen nötig, die einer kritischen Betrachtung unterzogen werden müssen. Insbesondere bleibt zu bewerten, ob die eingesetzte Energie oder der nötige Energieaufwand nicht die ökologischen Vorteile des Anbaus oder der Schonung anderer, in der Regel endlicher Ressourcen, zunichte macht. Inzwischen liegen



vielfältige Studien vor, die sich mit der Frage einer ganzheitlichen Bewertung von Baustoffen, auch speziell von Dämmstoffen, beschäftigen (u. a. SCHULZE 1999, PAPROTH UND WEIß 2001, KAISER 2001, BUSCHMANN 2003, FNR 2007).

Der Einsatz von Dämmstoffen auf Basis natürlicher Rohstoffe bringt neben dem bereits angesprochenen Problem einer eingeschränkten Mengenverfügbarkeit, die sich schlicht aus den begrenzten Anbaugebieten heraus erklärt, aber noch weitere bedenkenswerte Fragestellungen mit sich.

Alle organischen Materialien bestehen zu einem überwiegenden Teil aus Kohlenstoff und gehören damit prinzipiell der Klasse „brennbarer Baustoffe“ an. Um die erforderliche Klassifizierung normalentflammbar zu erreichen, sind bei vielen natürlichen Dämmstoffen chemische Zuschlagstoffe erforderlich, die bei der Entsorgung, egal ob thermisch oder stofflich, berücksichtigt werden müssen. Das gleiche gilt für die Resistenz gegen Schimmelbefall, insbesondere im Feuchtbereich und den Abbau durch tierische Schädlinge, beispielsweise Insektenbefall. Auch diesen Umständen muss entweder konstruktiv oder durch entsprechende Imprägnierung und Schutzausstattungen Rechnung getragen werden. Darüber hinaus sind neben der Umweltbelastung auch gesundheitliche Fragestellungen nicht zu vernachlässigen. Nach dem zweiten Weltkrieg verstärkt eingesetzte Korkdämmstoffe führten beispielsweise nicht nur zu einer Gefährdung der Korkeichenbestände durch Übernutzung, sondern stellten auch eine enorme Gesundheitsgefährdung durch die Verwendung von Steinkohlenteerpech dar, das als krebserregend gilt (LEHMANN 2004b).

Aber selbst wenn der Einsatz und die Verarbeitung unbedenklich ist und eine unkritische Entsorgung sichergestellt scheint, sind immer noch die Erzeugungsbedingungen kritisch zu durchleuchten. Baumwolle, als nachwachsender Rohstoff in vielfältigster Weise einsetzbar, wird beispielsweise überwiegend in Monokulturen in Entwicklungsländern angebaut. Auch hier sind die Auswirkungen auf die dortige Vegetation, die einseitige Bodennutzung und der Einsatz von Fungiziden und Pestiziden zu klären (LEHMANN 2004b).

## 4 Material und Methoden

Da innerhalb der Methodenbeschreibung auch orientierende Versuche zur Entwicklung beschrieben werden, müssen die zum Einsatz kommenden Materialien bekannt sein.

### 4.1 Materialcharakterisierung

Die Untersuchung gliedert sich in ein Material- und Methodenscreening (5.1), in dem orientierend ein breites Spektrum an Span- und Fasersortimenten untersucht wurde und den Versuchsteil (5.2), in dem mit ausgewählten Materialien weiterführende Versuchsreihen durchgeführt wurden.

#### 4.1.1 Material für das Material- und Methodenscreening

Im Folgenden werden die im Rahmen des Material- und Methodenscreenings (5.1) verwendeten Materialien beschrieben. Außerdem wird die Vorgehensweise bei der Homogenisierung und Klimatisierung der Proben erläutert.

##### 4.1.1.1 Materialbeschreibung

Zum Projektstart wurden unterschiedlichste Span- und Fasersortimente beschafft, die als potentiell geeignet erschienen mit dem FES unter Beachtung der in Punkt 2 Zielsetzung beschriebenen Projektziele sinnvoll in Mischung gebracht zu werden. Alle Materialien sollten dabei möglichst naturbelassen sein, wobei bei zwei Sortimenten Brandschutzzuschläge aufgebracht waren. Die beschafften Materialien unterscheiden sich in ihren Rohstoffen, der Streudichte, der Partikelstruktur und dem Grad der Aufbereitung (teilweise abgesiebt oder zerkleinert). In Anhang 12 befindet sich eine herausklappbare Tabelle, in der die verwendeten Materialien zusammengestellt sind und eine Kennziffer vergeben wird.

Das verwendete FES 01 stammt vom Institut für Werkzeugmaschinen in Stuttgart und wurde mit einem Kegelstirnplanfräsprozess unter Laborbedingungen hergestellt. Die Materialien 02, 03 und 04 wurden bei der Fa. A (Hobelwerk) direkt aus der Absauglinie entnommen. Die Fichte Kreissägespäne 05 wurden von einer Freiluftlagerhalde der Fa. B (Sägewerk) entnommen. Der Hobeldämmspan 06 entstammt einer Aufbereitungsanlage der Fa. C (Fertighaushersteller) und stellt eine abgesiebte Mischung unterschiedlicher Hobelspäne (Zukauf und eigene Reststoffe aus der Produktion) dar, die zusätzlich mit einer Brandschutzausrüstung aus Soda und Molke versehen wurden. Der Holzstoff 07 wurde von der Fa. D zur Verfügung gestellt und entstammt einem Extruderprozess. Die Fa. E stellte handelsüblichen Faserstoff 08 aus einem thermomechanischen Refinerprozess zur Verfügung. Altpapierflocken 09 wurden von der Fa. F bezogen. Dieses Produkt ist ebenfalls mit einer Brandschutzausrüstung (Borsalze) versehen. Der Wiesengrasdämmstoff 10 stellt eine Produktprobe der Fa. G dar. Die verwendeten Miscanthusspäne 11 stammen aus einem früheren Projekt am Institut für Holzforschung. Hier wurden die Miscanthusstängel mit einem Hacker zerkleinert. Die Hanfschäben 12 und Hanffasern 13 wurden von der Fa. H geliefert, wobei die Hanfkurzfasern an der HFM mit einer Schneidmühle zerkleinert wurden, da die ursprüngliche Faserlänge mit dem FES nicht in Mischung zu bringen war. Das Gleiche gilt für die Flachsfasern 14, die genau wie die Flachsschäben 15 von der Fa. I bereitgestellt wurden.



Abbildung 4-1 Materialprobe 01 FES



Abbildung 4-2 Materialprobe 02 Fichte Hobelspan



Abbildung 4-3 Materialprobe 03 Fichte Bandsägespan



Abbildung 4-4 Materialprobe 04 Lärche Hobel-/Bandsägespan



Abbildung 4-5 Materialprobe 05 Fichte Kreissägespan



Abbildung 4-6 Materialprobe 06 Hobeldämmspangemisch



Abbildung 4-7 Materialprobe 07 Holzstoff



Abbildung 4-8 Materialprobe 08 Faserstoff



Abbildung 4-9 Materialprobe 09 Altpapierflocken



Abbildung 4-10 Materialprobe 10 Wiesengrasdämmstoff



Abbildung 4-11 Materialprobe 11 Miscanthusspäne



Abbildung 4-12 Materialprobe 12 Hanfschäben





Abbildung 4-13 Materialprobe 13 Hanffasern



Abbildung 4-14 Materialprobe 14 Flachschäben



Abbildung 4-15 Materialprobe 15 Flachsfasern

#### 4.1.1.2 Homogenisierung und Klimatisierung des Ausgangsmaterials

Die für das Material- und Methodenscreening beschafften Materialproben lagen in homogenen Chargengrößen von ca.  $0,5 \text{ m}^3$  –  $1 \text{ m}^3$  vor und wurden, wie in 4.2.1.1 beschrieben, durch Kegeln und Vierteln geteilt. Eine Ausnahme bildet der Frässpan vom IfW in Stuttgart, das Basismaterial zur Mischung. Das hier zur Verfügung stehende Material wurde in etwa 25 Säcken (zu jeweils ca.  $0,3 \text{ m}^3$ ) vom IfW übernommen, wobei exakte Angaben über die Produktionsparameter fehlten. Die einzelnen Chargen unterschieden sich in ihrem Feuchtigkeitsgehalt deutlich. Zum einen war ein Teil der Späne unkontrolliert luftgetrocknet, während andere nach der Herstellung direkt (d. h. nass) in Säcke verpackt wurden. Die Materialfeuchte der trockenen Späne lag zwischen 11 % - 14 %. Das nasse Material hatte eine Feuchte zwischen 43 % - 72 %.

Im Weiteren unterschieden sich auch die Materialfeuchten der eingespannten Fichtenstämme, was sich laut mündlicher Aussage des Projektpartners in Stuttgart auch auf die Spanmorphologie auswirkt. Bei dem vorliegenden Material konnten im Wesentlichen zwei sich deutlich unterscheidende Spanformen festgestellt werden. Der überwiegende Anteil bestand aus relativ breiten, nur schwach gekrümmten Spänen mit glatter Oberfläche und auf die Hälfte gebrochenen Spänen, die teils noch am Ende der maximalen Spandicken zusammenhängen. Der Feinanteil dieser Chargen war subjektiv beurteilt relativ gering. Diese Spanform entstammt einem Fräsprozess an frischen Stämmen hoher Holzfeuchte (Abbildung 4-16 Links).

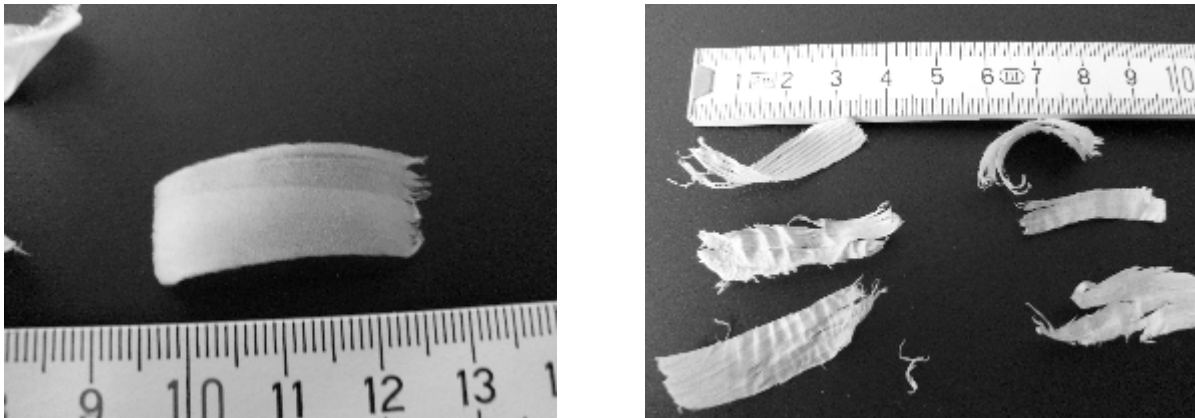


Abbildung 4-16 FES 01: Links: Spanform glatt, Rechts: Spanform gewellt

Daneben waren auch deutlich gewellte Spanflächen zu beobachten, die insgesamt undefinierter geschnitten erschienen und oft auch deutlich feiner gebrochene Späne enthielten. Dieses Material wurde mit einem Kegelstirnplanfräsprozess aus trockenem Holz hergestellt (Abbildung 4-16). (GROß 2005)

Nach einer Trocknung der noch nassen Chargen in einem Konvektionstrockner (je nach Feuchtegehalt ca. 4 – 5 Stunden bei 60°C) wurde das Material über alle Spanformen hinweg mit der Methode zur Bildung einer Sammelprobe durch fraktionales Schaufeln, wie es in 4.2.1.1 beschrieben ist, homogenisiert. Konkret wurde das Material über ein Langsieb der Maschenweite 1 mm geführt. Der Feinanteil < 1 mm hatte einen Massenanteil von 5,4 %, bezogen auf die Gesamtmenge des getrockneten Materials. Nach der Homogenisierung wurde das Material im Normklima (20/65) klimatisiert. Die verwendeten Proben wurden später wieder durch Kegeln und Vierteln der neuen Grundgesamtheit auf die jeweilige Probenmenge reduziert.

#### 4.1.1.3 Streudichte

In Tabelle 4-1 sind die Streudichten der Einzelmaterialien dargestellt (Methode: siehe 4.2.1.4). Auffällig sind die hohen Variationskoeffizienten der Materialien 01, 04 und 10.

Tabelle 4-1 Streudichten der Einzelmaterialien in 20/65

Mat. kennz.	Material	u [%]	MIN [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MAX [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\bar{x}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	s [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	V [%]
01	FES	12,7	12,6	14,9	13,7	0,93	6,81 %
02	Fichte Hobelspan	13,0	45,5	49,7	48,0	1,76	3,66 %
03	Fichte Bandsägespan	13,9	231,5	239,2	236,1	3,28	1,39 %
04	Lärche Hobel-/Bandsägespan	13,4	96,5	115,1	105,6	8,40	7,96 %
05	Fichte Kreissägespan	10,5	145,3	147,4	146,5	0,82	0,56 %
06	Hobeldämmspangemisch	13,8	32,7	34,0	33,4	0,52	1,56 %
07	Holzstoff	12,9	34,4	36,5	35,6	0,74	2,09 %
08	Faserstoff	10,4	38,0	39,3	38,9	0,50	1,29 %
09	Altpapierflocken	12,2	31,5	34,2	32,5	1,07	3,28 %
10	Wiesengrasdämmstoff	12,2	26,2	31,9	28,5	2,53	8,89 %
11	Miscanthusspäne	12,8	148,0	156,3	153,4	3,40	2,22 %
12	Hanfshäben	12,7	95,5	98,2	96,5	1,07	1,11 %
13	Hanfasern	11,5	81,8	84,4	82,9	0,94	1,14 %
14	Flachsschäben	14,0	106,5	112,7	109,6	2,25	2,05 %
15	Flachsfasern	11,1	47,3	52,9	49,7	2,00	4,03 %

Das FES 01 (V 6,81 %) weist wie beschrieben eine großvolumige, d. h. flächige und gekrümmte Spanstruktur auf, was vermutlich dazu führt, dass sich im verwendeten Prüfzylinder ein mehr oder minder starker Brückeneffekt ausbilden kann, was zu Streuungen der Werte führt. Bei den Lärchen Hobel-/Bandsägespänen 04 (V 7,96 %) könnte der Anteil der kompakten Bandsägespäne für die starke Streuung verantwortlich sein. Die verhältnismäßig schwere Komponente (Fichte Bandsägespäne aus der gleichen Sägelinie stellen mit  $236,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  das Material mit der höchsten Schüttdichte) ist nicht stabil im Spangemisch gebunden, sondern setzt sich leicht ab, was das Homogenisieren der Proben schwierig gestaltet und somit die Werte der Einzelproben, bezogen auf den Mittelwert, entsprechend verfälscht. Der hohe Variationskoeffizient des Wiesengrassdämmstoffs 10 (V 8,89 %), ist hingegen offensichtlich durch die Bildung von Hohlräumen zwischen unregelmäßig auftretenden Agglomeraten im Material bedingt. Der große Unterschied in der Streudichte der Bandsägespäne 03 und der Kreissägespäne 05, lässt sich auf die Spanform der würfelig prismatisch gebrochenen Bandsägespäne 03 zurückführen, die in dem Prüfgefäß dichter gepackt zu liegen kommen, als die eher länglichen Kreissägespäne 05.

#### 4.1.1.4 Siebanalyse

Im Rahmen des Materialscreenings wurde nur die in allen Mischungen verwendete Komponente FES 01 einer Siebanalyse unterworfen. Die Ergebnisse aus fünf Einzelmessungen entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.3 sind in Abbildung 4-17 dargestellt.

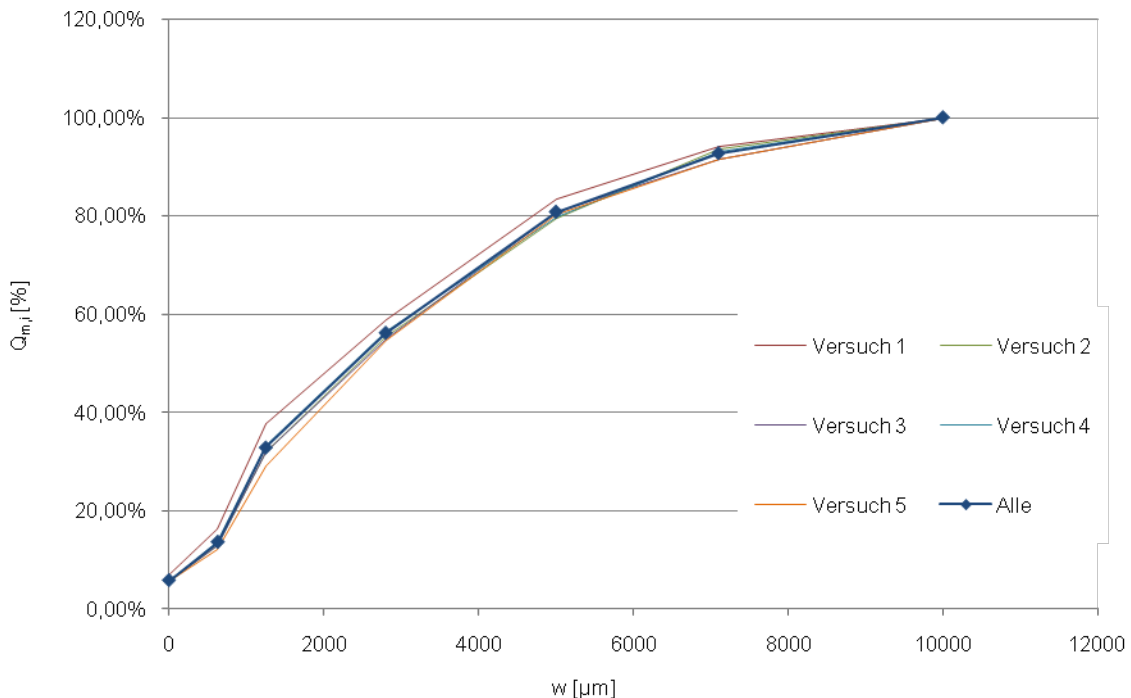


Abbildung 4-17 Siebkennlinie des Materials FES 01 (Massenverteilungssumme  $Q_{m,i}$ )

Die ermittelten Massenanteile der jeweiligen Siebmaschenweiten unterstreichen den großvolumigen, flächig gekrümmten Spancharakter. Mit knapp 20 % ( $1250 \mu\text{m} \geq \text{Fraktion} < 2800 \mu\text{m}$ ) und knapp 25 % ( $2800 \mu\text{m} \geq \text{Fraktion} < 5000 \mu\text{m}$  sowie  $5000 \mu\text{m} \geq \text{Fraktion} < 7100 \mu\text{m}$ ) stellen diese drei Spangrößen den überwiegenden Massenanteil dar. Die Siebungsparameter sowie die Werte der gemittelten Massenanteile aus den fünf durchgeführten Einzelversuchen sind in wiedergegeben. Die Siebfraktionen sind in Abbildung 4-18 dargestellt.



Abbildung 4-18 Siebfractionen des Materials 01 FES

#### 4.1.2 Material für die Versuche mit ausgewählten Materialvarianten

Im Folgenden werden die im Rahmen der weiterführenden Versuche (5.2) verwendeten Materialien beschrieben.

##### 4.1.2.1 Materialbeschreibung

###### FES H01

Die Frässpäne wurden am IfW in Stuttgart auf einer dort installierten Technikumsanlage mit einem Kegelstirnplanfräser aus frischem und noch feuchtem Stammholz hergestellt. Die Holzfeuchte der Stämme vor der Zerspanung wurde nicht gemessen. Dieses Material bildet wie in den Vorversuchen die Komponente FES (FES H01). Entgegen dem in den Vorversuchen verwendeten Material entstammen die vorliegenden Späne einem einheitlichen Fräsprozess mit definierter Schneidengeometrie (Tabelle 4-2).

Die gewählten Zerspanungsparameter stellen das Ergebnis einer parallel laufenden Untersuchung am IfW dar, in der Werkzeug- und Verfahrensparameter mit dem Ziel angepasst wurden, eine möglichst geringe volumenstabile Dichte des erzeugten losen Spangutes, bei ausreichenden Mengenleistungen, zu erzielen.

Tabelle 4-2 Werkzeug- und Verfahrensparameter zur Herstellung des Materials FES H01

	Parameter	Einheit	Wert
Werkzeug	Spanwinkel $\gamma$	°	20
	Neigungswinkel $\lambda$	°	0
	Keilwinkel $\beta$	°	60
	Freiwinkel $\alpha$	°	30
	Einstellwinkel $\kappa$	°	20
	Messer	Schneidenbreite b	mm
Radius r		mm	150
Maschinen-einstellung	Drehzahl n	1/min	3000
	Eingriff $a_e$	mm	5
	Vorschub $v_f$	m/min	7,5

Die Spanmorphologie unterscheidet sich dementsprechend von dem Material der Vorversuche (4.1.1). Das Material wurde in ca. 50 Säcken unterschiedlicher Befüllung angeliefert und unterschied sich vor allem hinsichtlich der Spanfeuchte (ca. 35 % - 85 %) und des Rindenanteils. Der Aufbereitungsprozess begann mit der Ausbreitung der noch feuchten Späne im Raumklima, um der Bildung von Schimmelpilzen an den noch feuchten Spänen entgegenzuwirken. Die technische Trocknung des Spanmaterials wurde in einem Frischluft/Ablufttrockner vorgenommen. Hierbei wurde das Material in ca. 15 Chargen bei 70°C und einer Trocknungsdauer von ca. 2-3 h getrocknet. Die Materialfeuchte am Ende der technischen Trocknung lag bei ca. 4 % - 8 %.

Nach der Trocknung wurde das Material auf einem Langsieb der Maschenweite 1,5 mm abgesiebt, um den visuell sehr hohen Rindenanteil zu entfernen. Dabei wurde im Mittel ca. 14,5 % Feinanteil abgesiebt. Nach der Siebung wurde das Material in insgesamt 3 Chargen gekegelt und geviertelt. Damit wurden 32 Säcke befüllt, wobei jede Charge jeden Sack zu ca. 1/3 füllt. Die Aufteilung auf 3 Chargen bedingte sich durch die begrenzte Raumhöhe.

Am Ende der Materialaufbereitung standen insgesamt ca. 120 kg<sub>atro</sub> des getrockneten und homogenisierten Spanmaterials zur Verfügung.

Fichte Hobelspan H02

Die verwendeten Hobelspäne wurden bei der Fa. A direkt aus der Absauglinie entnommen. Es handelt sich um Späne aus Fichtenholz, die an einer Profilhobelstraße zur Herstellung von Brettware aus getrocknetem Material anfallen. Das Material ist frei von Zusätzen.

Faserstoff H08

Der verwendete Faserstoff ist thermomechanisch aufgeschlossener Refinerfaserstoff aus Kiefernholz der Fa. E. Das Material lag überwiegend in unbehandelter Form vor. Daneben lag eine kleinere Materialmenge vor, die mit einer Imprägnierung aus Ammoniumphosphat und Borsäure beaufschlagt ist.

Altpapierflocken H09

Die verwendeten Altpapierflocken sind handelsübliche Altpapierflocken der Fa. F. Das Material wird in dieser Form als Einblas- oder Aufschüttdämmung zur wärmetechnischen Isolierung von Wandgefachen und Decken verwendet. Der Großteil des Materials wurde unbehandelt bezogen. Daneben lag eine kleinere Materialmenge vor, die mit ca. 8 % Boraten beaufschlagt ist, um Brandschutzeigenschaften sicherzustellen.

In Anhang 13 befindet sich eine herausklappbare Tabelle, in der die in den Hauptversuchen verwendeten Materialien zusammenfassend aufgelistet sind. Es wird eine Kennziffer zugeordnet, die der Materialzuordnung der Vorversuche entspricht. Zur Unterscheidung mit den Vorversuchen sind die in den Hauptversuchen verwendeten naturbelassenen Materialien mit einem vorangestellten „H\*\*\*“ gekennzeichnet. Ein der Materialkennung nachgestelltes „\*\*\*i“ bezeichnet die ansonsten gleichen, aber imprägnierten Materialvarianten.

4.1.2.2 Streudichte

Die Streudichte der Materialien wurde, wie in 4.2.1.4 beschrieben, bestimmt. Je Materialvariante wurden sechs Einzelversuche durchgeführt.

Tabelle 4-3 Streudichten der Einzelmateriale der Hauptversuche bei 20/65

Mat. kennz.	Material	u [%]	MIN [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MAX [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\bar{x}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	s [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	V [%]
H01	FES	11,3	13,8	16,2	14,6	0,80	5,46
H02	Fichte Hobelspan	11,3	54,3	58,6	56,7	1,56	2,75
H08	Faserstoff	11,0	24,3	24,8	24,5	0,15	0,61
H09	Altpapierflocken	8,13	37,1	38,1	37,7	0,31	0,83

4.1.2.3 Siebanalysen

Die, wie in 4.2.1.3 beschrieben, ermittelten Siebungsparameter sind zusammen mit den Massenanteilen der einzelnen Fraktionen in Anhang 3 dargestellt. Je Material wurden sieben Einzelversuche durchgeführt. Abbildung 4-19 zeigt die gemittelten Massenverteilungssummen der Materialien graphisch aufgetragen über der Siebmaschenweite im Vergleich. Die imprägnierten Varianten unterscheiden sich in der Partikelgrößenverteilung nur geringfügig von den nicht imprägnierten Varianten und sind deshalb nicht gesondert aufgeführt.

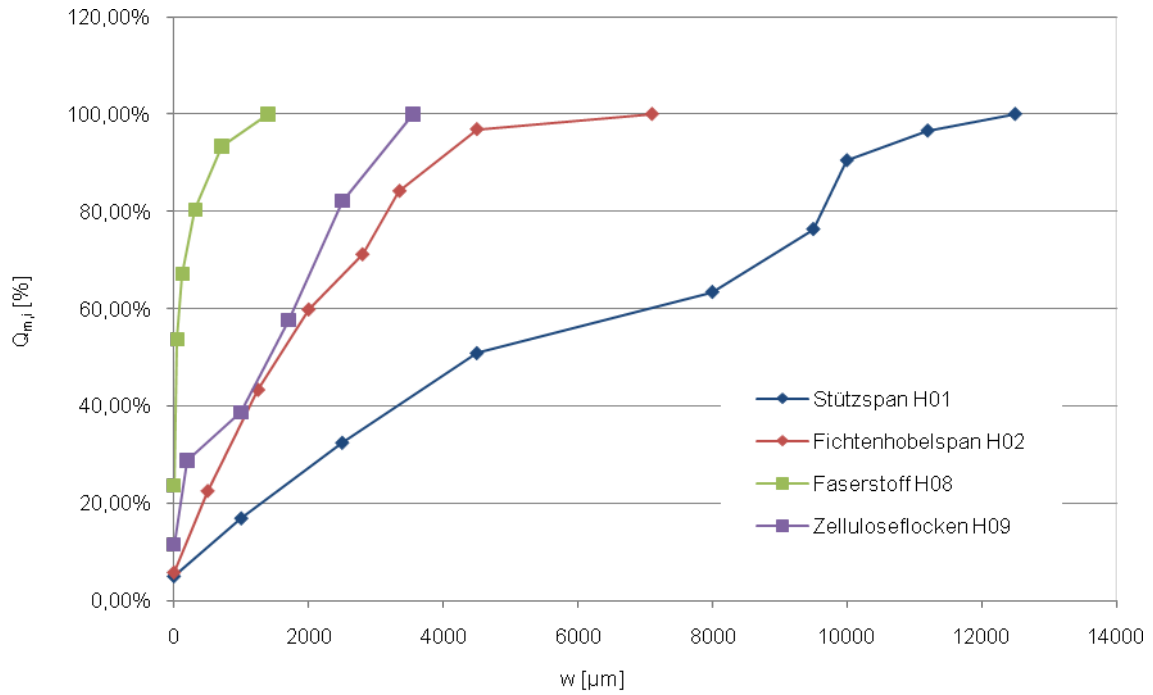


Abbildung 4-19 Mittlere Massenverteilungssumme aufgetragen über der Siebmaschenweite

In Abbildung 4-20 bis Abbildung 4-23 finden sich Aufnahmen der Siebrückstände der Fraktionen. Die imprägnierten Varianten H08i und H09i entsprechen der Struktur nach den nicht imprägnierten Varianten H08 und H09 und sind deshalb nicht gesondert abgebildet.





Abbildung 4-20 Siebrückstände des Materials H01 FES

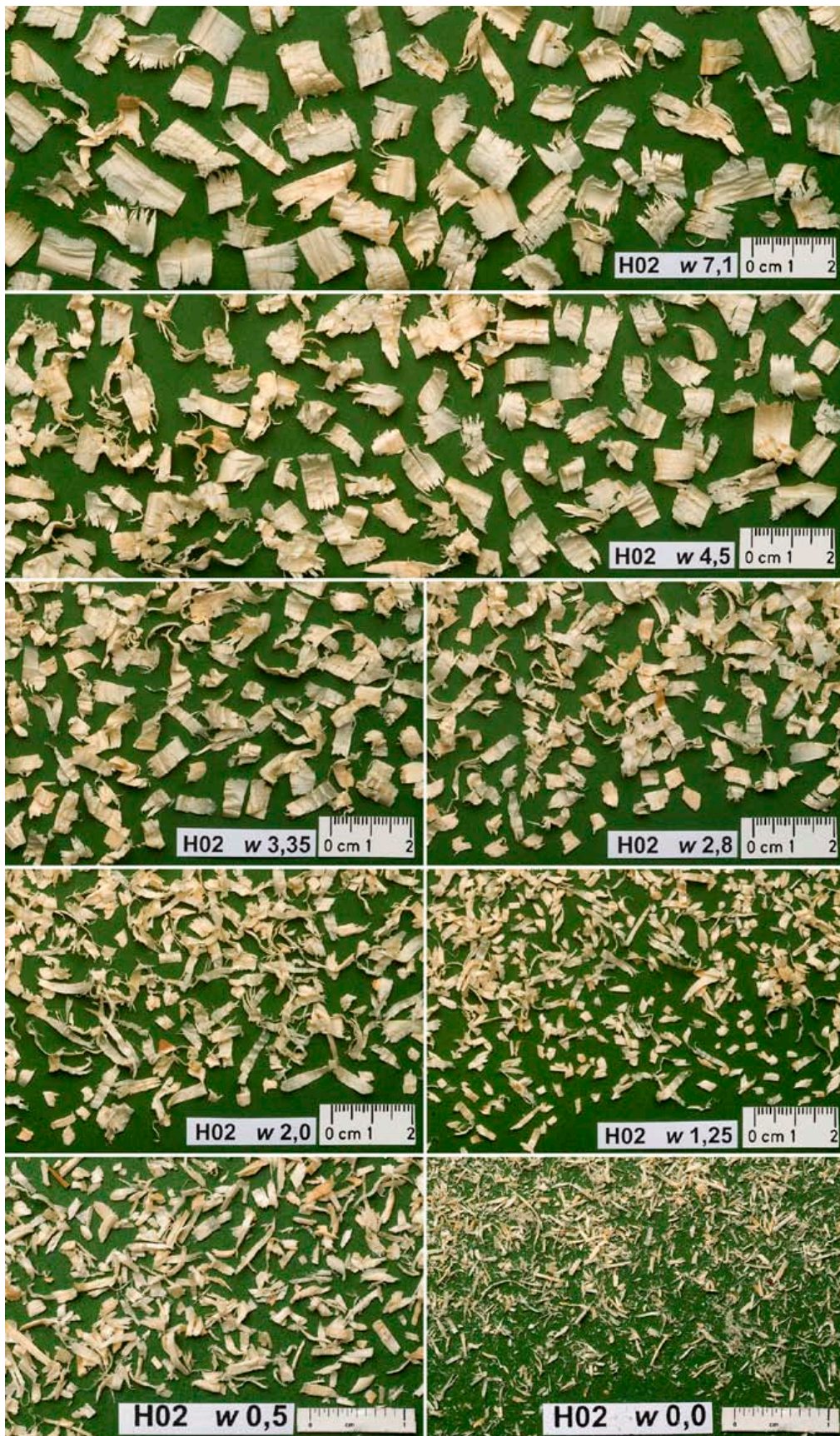


Abbildung 4-21 Siebrückstände des Materials H02 Fichte Hobelspan

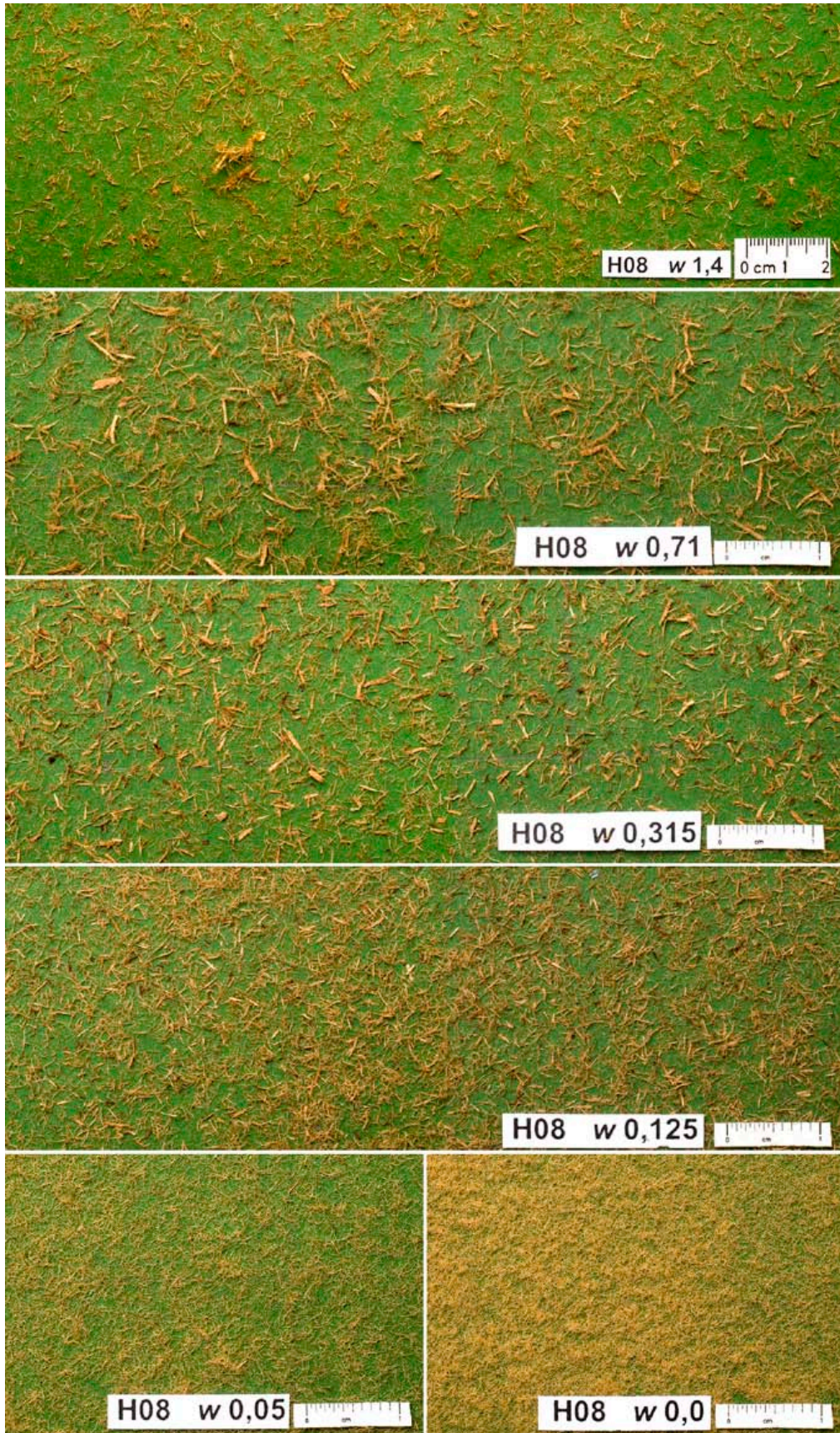


Abbildung 4-22 Siebrückstände des Materials H08 Faserstoff

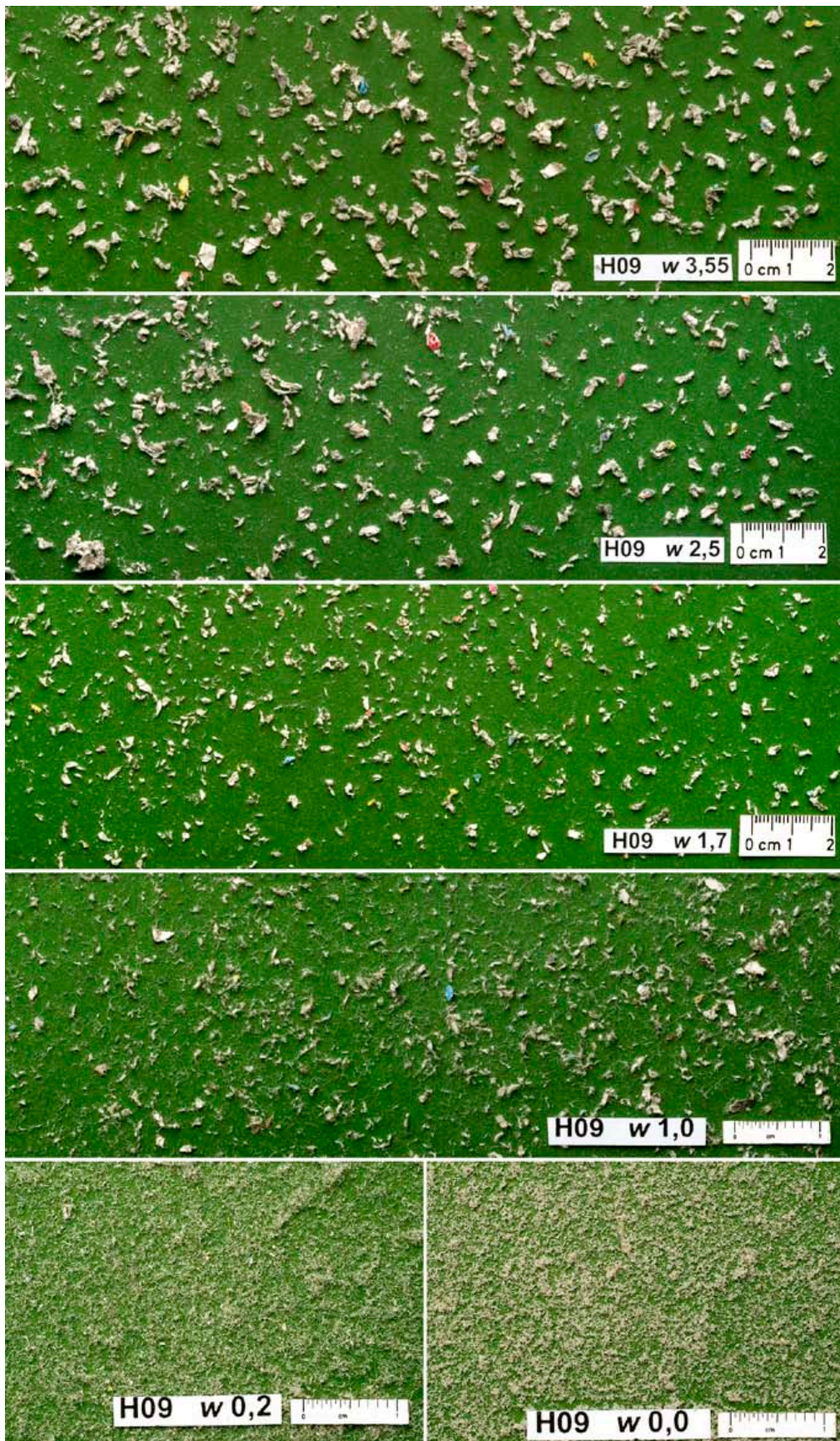


Abbildung 4-23 Siebrückstände des Materials H09 Altpapierflocken

## 4.2 Methoden

Im Folgenden werden die Versuchsabläufe und Methoden beschrieben, wie diese bei der Prüfung der untersuchten Stoffe angewendet wurden.

### 4.2.1 Beschreibung genormter und bekannter Methoden

Zuerst werden Standardmethoden der Materialcharakterisierung und –prüfung beschrieben, die durch Normenvorgaben geregelt sind oder bereits in früheren Projekten entwickelt und angewendet wurden.

#### 4.2.1.1 Probenziehung und Probenteilung

Grundlegende Bemerkungen zur Probennahme und Probenteilung finden sich in EN 932-1. Die für die durchgeführten Untersuchungen zur Verfügung stehenden Materialproben stellen im Prinzip Sammelproben dar, die teils als Fertigware bezogen wurden, teils der laufenden Produktion entnommen wurden und teils aus Aufbereitungsprozessen im Labor stammen. Da sich somit nicht für alle Materialien nachvollziehen lässt, inwieweit die Sammelproben als repräsentativ für die tatsächliche Grundgesamtheit der Produktion bzw. des Labor- oder Technikumsprozesses angenommen werden können, werden im Folgenden die Sammelproben als Grundgesamtheit definiert und entsprechend bezeichnet. Die verwendeten Span- und Faserstoffe sind ihrer Materialstruktur nach durchgängig polydisperse Systeme, enthalten also unterschiedlich ausgeformte Partikel. Da die vorhandenen Korngrößen nie gleichmäßig verteilt sind, ist es in jedem Fall notwendig, das Ausgangsmaterial zu homogenisieren, um Probenstrukturen zu erhalten, die für die Grundgesamtheit repräsentativ sind. In EN 932-1 werden für grobdisperse Schüttgüter anzuwendende Verfahren der Probenteilung beschrieben, die in entsprechender oder adaptierter Form angewendet wurden.

#### Einengung einer Sammelprobe durch Vierteln:

Bei diesem Probenteilverfahren wird das vorliegende Material zu einem Kegel aufgeschüttet, wobei die Materialaufgabe mit der Probenschaufel stets auf die Spitze des aufgeschütteten Kegels erfolgt. Ein mehrfaches Umsetzen des Kegels zur ersten Homogenisierung vor dem Vorgang des Vierteln, wie er in EN 932-1 beschrieben wird, erscheint bei den relativ bruchempfindlichen Spänen nicht sinnvoll. Anschließend wird der Kegel mit Blechen in Viertel aufgeteilt (Abbildung 4-24), um aus den jeweils gegenüberliegenden Vierteln einen neuen Kegel aufzuschütten. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Probenmenge vorliegt.

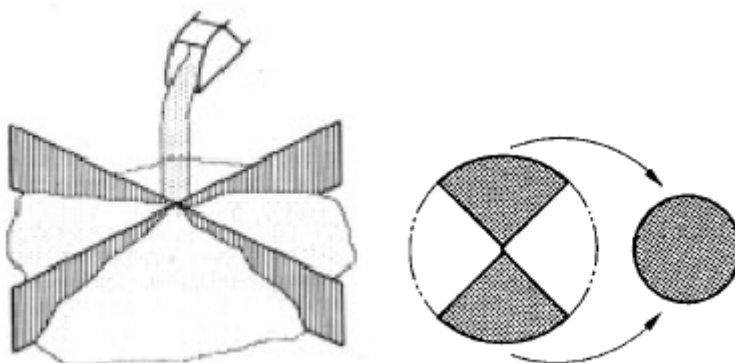


Abbildung 4-24 Prinzip der Einengung einer Sammelprobe durch Vierteln

#### Bildung einer Sammelprobe durch fraktionales Schaufeln:

Das fraktionale Schaufeln ist ein Verfahren, das in der EN 932-1 eigentlich zur Probenteilung vorgesehen ist. Aus der Methode wurde aber ein Verfahren zur Bildung einer homogenen

Sammelprobe aus Einzelchargen unterschiedlicher Zusammensetzung abgeleitet. Hierbei wurde über ein Langsieb aus einer Reihe von Säcken mit Spänen unterschiedlicher Spanformen der Reihe nach jeweils eine Schaufelfüllung des Materials aufgegeben und am Ende abgezogen und in Säcke abgepackt. Das Endmaterial wurde wieder als Grundgesamtheit zur Probenentteilung durch Vierteln herangezogen und stellt damit eine gleichmäßige Mischung der in den ursprünglichen Säcken enthaltenen Spanformen dar.

### 4.2.1.2 Bestimmung der Materialfeuchte

Holz ist ein hygroskopisches Material. Alle Angaben zu Dichte oder Masse sind demnach nur sinnvoll bei gleichzeitiger Kenntnis der Materialfeuchte. Die Materialfeuchte der untersuchten Span- und Faserstoffe und deren Mischungen wird in Anlehnung an DIN EN 322, im Weiteren als Darrmethode bezeichnet, durch die Bestimmung des Massenverlustes zwischen der feuchten Probe und der bei 103°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) bis zur Gewichtskonstanz gedarrten Probe bestimmt. Der Massenverlust in Prozent der Trockenmasse ergibt die Materialfeuchte der Probe in Prozent. Entgegen dem in DIN EN 322 beschriebenen Verfahren wird bei den untersuchten Materialien auf Zwischenwägungen zum Nachweis der Gewichtskonstanz verzichtet. Durch die große Oberfläche und die verhältnismäßig geringe Masse der verwendeten Späne und Fasern wird der darrtrockene Zustand nach 3 h in jedem Fall erreicht, was in Vorversuchen nachgewiesen werden konnte.

Alternativ kann die Materialfeuchte auch mit einer Schnelldarrwaage der Fa. Automation Components (ACO), Typ Ultra X 20\_1/D, bestimmt werden. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, ist in der Methodenbeschreibung angegeben.

### 4.2.1.3 Ermittlung der Siebkennlinie (DIN 66165)

Die Siebkennlinie dient der Darstellung der Korngrößenverteilung eines polydispersen Systems. Zur Ermittlung der Siebkennlinie wird eine definierte Materialmenge in das oberste Sieb eines mit absteigenden Siebmaschenweiten (Nennöffnungsweite des Siebbodens  $w$ ) aufgebauten Siebturmes aufgegeben. Anschließend wird eine Relativbewegung zwischen dem Siebgut und der Siebfläche mit dem Ziel erzeugt, die aufgegebenen Partikel entsprechend ihrer Korngröße auf die unterschiedlichen Fraktionen zu verteilen. Bei mechanischen Siebmaschinen wird hierzu entweder eine Bewegung des Siebturmes in zwei oder drei Raumrichtungen erzeugt oder es wird das die Partikel umgebende Fluid (Luft, Spülflüssigkeit) bewegt, wobei auch Kombinationen aus diesen Verfahren möglich sind (DIN 66165-1; DIN 66165-2). Praktische Hinweise zur Durchführung von Siebanalysen mit Holzpartikeln finden sich unter anderem in ANONYMUS 1978 und VOGEL 1999.

Für die durchgeführten Versuche stand eine Plansiebmaschine Fa. Retsch, Typ KS 1000, sowie eine Wurfsiebmaschine Fa. Retsch, Typ AS 200 control, zur Verfügung. Die Plansiebmaschine erzeugt horizontale, elliptische Bewegungen in zwei Raumrichtungen. Als Einstellmöglichkeit kann die Umdrehungszahl pro Minute manipuliert werden. Die Wurfsiebmaschine führt eine Wurfbewegung in 3 Raumrichtungen aus, die überwiegend aus vertikalen Sinusschwingungen besteht, denen ein Drehimpuls überlagert wird, wodurch das Siebgut in dem Rundsieb eine kreisförmige Bahn durchläuft. Die Intensität des Siebvorgangs kann entweder über die Siebbodenbeschleunigung in Vielfachen der Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  oder über die Einstellung der Schwingweite  $A$  [mm] geregelt werden. Es werden runde Analysensiebe nach ISO 3310/1 mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Höhe von 50 mm verwendet. Die Zusammenstellung der Siebmaschenweiten erfolgt jeweils in Vorversuchen. Ziel ist eine Siebmaschenverteilung die als obersten Rückstand und untersten Durchgang annähernd 5 % der Aufgabemasse einstellt; in den dazwischen liegenden Sieben sollten die Anteile je Siebfraction möglichst gleichmäßig verteilt vorliegen, wobei in einer Fraction nicht mehr als 25 % der Gesamtmasse anfallen sollten.

Vor und nach der Ermittlung der optimalen Siebmaschenverteilung wird die optimale Siebdauer durch Wägungen aller Siebrückstände im Abstand von 2 min ermittelt und wird für die untersuchten Materialien in Abweichung zur DIN 66165-1 definiert als die Zeit, nach der sich in allen Fraktionen die Rückstände bzw. Durchgänge um nicht mehr als 1 % Massenanteil je Minute ändern.

Für jeden Siebsatz muss überdies die Menge des Aufgabegutes in Abhängigkeit der größten Siebmaschenweite ermittelt werden. Nach DIN 66165-1 sollte die Aufgabemenge das Doppelte des größten zulässigen Schüttvolumens des Siebbodens  $V_f$  [ $\text{cm}^3_{\text{Material}}/\text{dm}^2_{\text{Siebbodenfläche}}$ ] nicht überschreiten. Hierzu müssen die Schüttdichten des Materials bekannt sein, die zuvor entsprechend 4.2.1.4 ermittelt wurden. Die tatsächlich gewählten Faktoren liegen materialspezifisch zwischen  $0,7 \times V_f$  (Altpapierflocken) und  $2,5 \times V_f$  (Spanmaterialien). Fasermaterialien zeigen bei der Siebung in Abhängigkeit des Siebsatzes und der Aufgabemenge zum Teil eine ausgeprägte Agglomerationsaffinität, die zu einer Vernadelung oder Verfilzung des Materials auf einer bestimmten Siebmaschenweite führt. Diesem Effekt konnte durch eine Verringerung der Aufgabemenge sowie einer Reduzierung der Zahl der verwendeten Siebe entgegengewirkt werden. Bei einer Reduzierung der Aufgabemenge ist die zur Verfügung stehende Wägepräzision zu berücksichtigen. Auch die Vorschaltung von Sieben größerer Maschenweite (Siebrückstand null) brachte teilweise eine Verbesserung des Siebergebnisses, da die auch am Anfang unweigerlich vorhandenen Agglomerate langsam aufgelöst und stückweise den kleineren Siebmaschenweiten zugeführt werden. Auf die Ermittlung der Trenngrenze wird verzichtet.

Die beschriebenen Parameter werden für jedes Material getrennt ermittelt und sind in der Ergebnisdarstellung angegeben. Im Material- und Methodenscreening werden schließlich fünf, in den Hauptversuchen sieben Siebanalysen durchgeführt und in einer gemittelten Siebkennlinie als Massenverteilungssumme  $Q_{m,i}$  zusammengefasst. Die Massenanteile der Fraktionen beziehen sich auf die Rückwaage der Fraktionen. Einschränkend muss angemerkt werden, dass die Siebanalyse keine direkte Trennung der unterschiedlichen Span- und Faserformen ermöglicht, sondern lediglich Fraktionen liefert, die über das zu Grunde liegende Kollektiv unter den entsprechend beschriebenen Versuchsbedingungen für den gewählten Siebsatz charakteristisch sind (ARNOLD 1986).

#### 4.2.1.4 Ermittlung der Schüttdichte

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe Schüttdichte und Streudichte sind sinngleich zu verstehen und stellen den Quotienten aus der Masse des Materials gerechnet auf  $at_{ro}$  und dem ausgefüllten Volumen dar. Methodisch wird die Schüttdichte ermittelt, indem unter definierten Einstreubedingungen das Volumen eines zylinderförmigen Gefäßes mit dem zu untersuchenden Material bekannter Feuchte gefüllt wird. Die Methode entspringt im Prinzip der DIN 52110. Ein gleichwertiges Verfahren ist auch in einem Standard des IHD beschrieben (Anonymus 1969).

Das zu prüfende Material wird bis zur Gewichtskonstanz in 20/65 klimatisiert. Die Einstreuung homogener Proben (Masse in Vorversuchen ermittelt) erfolgt anschließend durch eine über dem Prüfzylinder traversierende Vibrationsrinne (Abbildung 4-25). Weitere Daten können der Tabelle 4-4 entnommen werden. Nachdem der Prüfzylinder randschlüssig gefüllt ist, wird die Masse an Material ausgewogen und unter Berücksichtigung der Feuchte auf  $at_{ro}$  gerechnet zu dem Volumen des Probenhalters ins Verhältnis gesetzt.

Tabelle 4-4 Einstreubedingungen zur Ermittlung der Streudichte

Streuhöhe			Messzylinder		
MIN [mm]	MAX [mm]	$\bar{x}$ [mm]	Höhe [mm]	Durchm. [mm]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
405	722	563,5	320	192	0,0093
Vibrationsrinne: Typ Vibra ER II					
Überfahrungen / min:		20			
Vibrationseinstellung:		0,9			

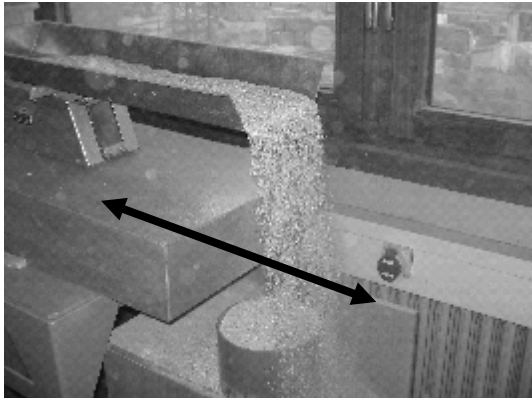


Abbildung 4-25 Traversierende Vibrationsrinne mit zylinderförmigem Auffanggefäß

Da der Versuchsaufbau in einem nicht klimatisierten Labor steht, verändert sich die Materialfeuchte über der Versuchsdauer. Zu Beginn eingestreutes Material wird am Boden des Prüfzylinders mit einer anderen Feuchte lagern, als gegen Ende eingestreutes Material, das obenauf zu liegen kommt. Je nachdem, ob das aktuelle Raumklima im Labor also feuchter oder trockener ist, als das zur Klimatisierung gewählte Normklima 20/65, wird die Materialfeuchte des im Zylinder oben liegenden Materials höher oder niedriger ausfallen. Um sich auf die mittlere Feuchte im Zylinder im Moment der Wiegung zu beziehen, werden deshalb zur Feuchtebestimmung drei Proben im klimatisierten Zustand vor Versuchsbeginn und drei Proben nach Versuchsende mit der Darrmethode nach 4.2.1.2 geprüft und der Mittelwert dieser sechs Messungen als tatsächliche Materialfeuchte angenommen. Vergleicht man die Materialfeuchte vor und nach dem Versuch miteinander, so ist bei den durchgeführten Versuchen in dem verhältnismäßig trockeneren Raumklima, in dem die Einstreuung vorgenommen wurde, zwar tatsächlich eine eindeutige Trocknung festzustellen. Diese fällt jedoch verhältnismäßig gering aus (meist < 0,5 %).

Die beschriebene Vorgehensweise unter Verwendung der Vibrationsrinne wurde in dieser Form nur zur Prüfung der Einzelmateriale angewendet. Vor allem bei den untersuchten Materialmischungen ist die Füllung des Prüfzylinders mit Hilfe der Vibrationsrinne ungünstig, da auf der Transportstrecke durch die Vibrationen zwar ein gleichmäßiger Materialfluss sichergestellt wird, vor allem aber unerwünschte Separierungseffekte auftreten. In diesem Fall wurde das Material vorsichtig mit einer Laborschaukel von Hand eingefüllt. Alle anderen beschriebenen Versuchsschritte wurden entsprechend beachtet.

#### 4.2.1.5 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit (DIN 52612)

Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien wird nach DIN 52612 mit dem Zweiplattenverfahren ermittelt. Zur Verfügung steht eine Messanlage der Fa. Taurus, Typ TLP 500-H. (Abbildung 4-26)



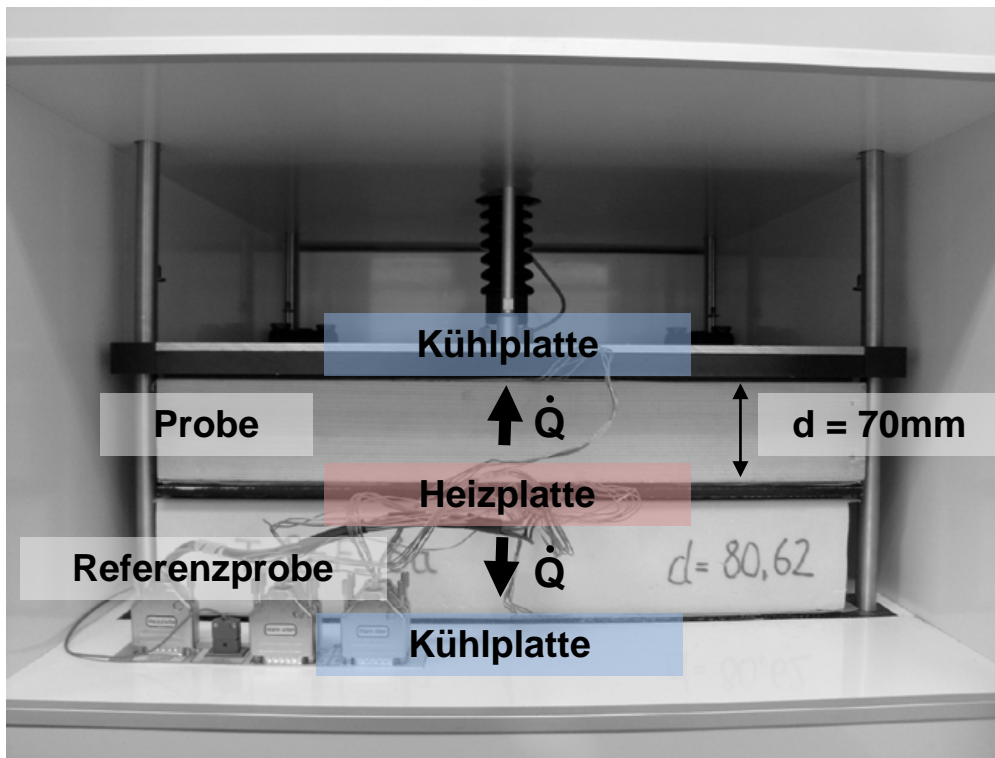


Abbildung 4-26 Wärmeleitfähigkeitsmessgerät Taurus TLP 500-H; Anordnung von Kühl- und Heizplatte mit eingebauter Probe (Probendicke = 70mm) und Referenzprobe

Das zu prüfende Material wird bei der Prüfung von Einzelmaterialien durch Kegeln und Vierteln aus der Grundgesamtheit, bei Mischungen direkt nach der Mischung aus der Mischertrommel entnommen. Die Probenmasse bestimmt sich dabei aus dem Volumen des Probenhalters, der Einbringdichte und der Materialfeuchte. Vor der Prüfung wird das Material bei 103°C für drei Stunden gedarrt. In Vorversuchen wurde festgestellt, dass bei dieser Trockenzeit der darrtrockene Zustand bei allen Materialien erreicht wird. Das Trocknen der Proben ist notwendig, da die Wärmeleitfähigkeit unter anderem auch von der Materialfeuchte abhängig ist (3.1.1). Um einen stationären Zustand des Wärmestroms in der Probe einstellen zu können, darf sich die Materialfeuchte der Probe während des Versuchs also nicht mehr ändern. Durch den Temperaturgradienten von Heiz- und Kühlplatte können sich bei der Verwendung von feuchtem Material Trocknungsprozesse einstellen, die das Ergebnis der Wärmeleitfähigkeitsprüfung, in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur und dem unterschiedlichen Trocknungsverhalten, beeinflussen.

Der Probenhalter besteht aus einem Fichtenholzrahmen, in dem ein Inlay aus Polystyrol montiert ist, in dessen Aussparung von 250 mm x 250 mm x 70 mm schließlich das zu prüfende Schüttgut eingebracht wird. Zur Herstellung einer Einbringdichte, die über der Streudichte des Materials liegt, kann das Material über einen Pressstempel in einem Einstreurahmen verdichtet werden.

Zur Reduzierung der Materialmenge und zur Vereinfachung der Probenvorbereitung ist die untere Probe durch eine Referenzprobe mit bekannter Wärmeleitfähigkeit ersetzt. Mit Hilfe der Ausgangsgrößen Spannung Heizplatte [V], Strom Heizplatte [A], Fläche der Heizplatte [m<sup>2</sup>], Dicke der Probe [m] und der mittleren Temperaturdifferenz über der Probe [K] errechnet sich schließlich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  für einen stationären Zustand des Wärmestromes in der Probe, der über ein im Programm hinterlegtes Stabilitätskriterium nachgewiesen wird. Es werden nacheinander drei Probenmitteltemperaturen (Sollwerte: 10°C, 20°C, 30°C) angefahren. Da die Wärmeleitfähigkeit auch von der Probenmitteltemperatur abhängt, müssen die  $\lambda$  – Werte auf ein vergleichbares Temperaturniveau bezogen werden. Hierzu wird der Wert  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  ermittelt, der sich aus der linearen

Regressionsgeraden der drei tatsächlich gemessenen Probenmitteltemperaturen im stationären Zustand für eine Probenmitteltemperatur von 10°C errechnet. Nach der Prüfung wird das Material ausgebaut und mit einer Analysenwaage gewogen. Die tatsächlich vorhandene Einbringdichte wird unter Berücksichtigung der Materialfeuchte nach der Prüfung (Zielwert 0 %) bestimmt.

#### 4.2.1.6 Ermittlung des Brandverhaltens (DIN 4102-1)

Zur Prüfung der Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 (Baustoffklasse 2) wird das zu untersuchende Material einer kleinen, definierten Flamme (Streichholzflamme) ausgesetzt, um die Entzündbarkeit und die Flammenausbreitung in einer bestimmten Zeit zu beurteilen.

Die für die gewünschte Einbringdichte erforderliche Materialmasse wird unter Berücksichtigung der Materialfeuchte, der Einbringdichte und des Probenvolumens bestimmt. Das Material wird entsprechend 4.2.1.1 repräsentativ entnommen und in einen Probenhalter aus Drahtgeflecht eingebracht. Der verwendete Probenhalter entspricht dem in ABM 1999 definierten Drahtgitterkasten mit einer unteren und oberen Begrenzung aus Hartholzklötzen sowie einer vertikal verlaufenden Beflammungsöffnung auf der Vorderseite (Abbildung 4-27). Da die zu prüfenden Materialien für die Maschenweite 9,6 mm zu fein sind, ist der Drahtkorb zusätzlich mit einem feineren Drahtgeflecht (Maschenweite 1 mm, Drahtdicke 0,36 mm) ausgekleidet.

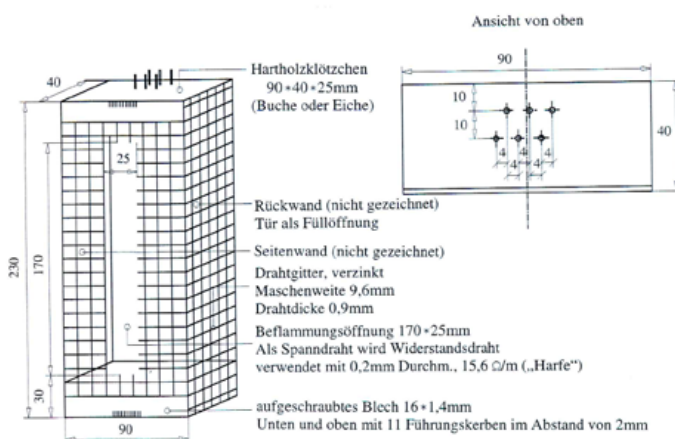


Abbildung 4-27 Drahtgitterkorb als Probenhalter zur Prüfung der Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 (ABM 1999)

Für Materialien, die „derart aus der Öffnung fallen, dass im Inneren des Probenhalters Hohlräume entstehen“ (ABM 1999), soll eine „aus 11 Reihen im Abstand von 2 mm bestehende harfenartige Bespannung aus 0,2 mm Draht eingesetzt werden“ (ABM 1999). Bei der Entscheidung, ob man mit oder ohne harfenartige Bespannung prüft, sind zusätzlich zu dem definierten Kriterium weitere teils gegenläufige Einflüsse abzuwägen. In STRENGE 1993 wird beschrieben, dass die Verwendung der harfenartigen Bespannung das Prüfergebnis manipuliert und auch die Anzahl der Drähte Einfluss auf das Ergebnis nimmt. Mit zunehmender Anzahl der vor die Beflammungsöffnung gespannten Drähte nimmt die maximale Flammenhöhe ab, da durch die Erwärmung der Drähte der Energieeintrag auf die Prüfoberfläche abgeschwächt wird; der Baustoff wird also bezüglich des Brandverhaltens positiver bewertet. Dem steht gegenüber, dass lose Materialien bei höheren Einbringdichten im Bereich der Beflammungsöffnung ohne die Drahtarfe die Zieleinbringdichte nicht halten, sondern aus der Beflammungsöffnung herausquellen. Es kommt also im Bereich der Beflammung zu einer niedrigeren lokalen Dichte. In STRENGE 1993, VOGEL 1999 und WEGENER et al. 2004 wird bei der B2-Prüfung aber beobachtet, dass bei den untersuchten losen Materialien ein Zusammenhang zwischen der Einbringdichte und der maximalen Flammenhöhe besteht. Dieser Nachweis kann nur gelingen, wenn

die Probe daran gehindert wird, aus der Beflammungsöffnung heraus zu expandieren. Aus den angeführten Gründen werden alle Materialien mit der harfenartigen Bespannung, bestehend aus elf Drähten, Drahtdicke 0,2 mm, geprüft, auch wenn das in ABM 1999 definierte Kriterium zur Verwendung dieser Hilfseinrichtung nicht erfüllt ist.

Das Befüllen des Probenhalters erfolgt über die zu öffnende Rückseite und wird mit einer Einstreuhilfe und einem Presstempel durchgeführt. Dabei wird die Probe überhöht eingestreut und anschließend verdichtet, um eine Lagenbildung des Materials zu verhindern und eine einheitliche und homogene Verdichtung sicherzustellen. Nach dem Befüllen wird der Probenhalter verschlossen und zur Klimatisierung mindestens 14 Tage bei 23/50 (DIN 50014) gelagert. Auf diese Weise werden fünf Proben je Materialmischung vorbereitet.

Direkt vor der Prüfung wird der Probenhalter noch von eventuell angelagertem Feinanteil, der sich durch die Befüllung der Probenhalter auf der Drahtharfe abgelagert hat, befreit. Hierzu wird ein weicher Haarpinsel verwendet. Zur Prüfung wird der vorbereitete Probenhalter nun mit Hilfe eines speziellen Rahmens senkrecht in einen Brennkasten nach DIN 50050-1 gehängt. Die Position der um 45° zur Probe hin geneigten Brennerdüse zur Probenfläche, wird mit einer Abstandslehre eingestellt. Der Flammenangriffspunkt soll mittig in der Beflammungsöffnung und 40 mm von der Probenunterkante entfernt liegen.

Die Flammenhöhe des mit Propangas betriebenen Brenners soll in der senkrechten Stellung des Brenners 20 mm betragen und wird ebenfalls mit einer Einstelllehre eingestellt. Der Brenner wird danach wieder um 45° geneigt. Die Beflammung der Probenfläche erfolgt nun durch ein Heranführen der Brennerdüse an die Probenfläche zu dem vorher eingestellten Flammenangriffspunkt und wird für 15 s gehalten. Anschließend wird der Brenner zurückgefahren und die Probe wird so lange beobachtet, bis die Flamme die obere Messmarke, die 150 mm über dem Flammenangriffspunkt liegt, erreicht oder vorher von selbst erlischt. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Flammenspitze bei keiner von je fünf Proben die obere Messmarke vor Ende der 20. Sekunde erreicht (DIN 4102-1). Da eine objektive Erfassung der Flammenhöhe durch reine Beobachtung schwierig ist, vor allem wenn die Flamme nur kurzfristig hochschlägt, wird der Versuchsablauf mit einer digitalen Videokamera festgehalten, um das Versuchsergebnis später exakt und objektiv bewerten zu können.

#### 4.2.1.7 Ermittlung der Sorptionsisothermen

Die Ermittlung der Sorptionsisothermen erfolgt mit der in KOLLMANN UND SCHNEIDER 1958 beschriebenen Einrichtung zur praxisnahen Messung von Sorptionseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Das Messprinzip ist dabei vergleichbar mit dem in EN ISO 12571 beschriebenen Exsikkator-Verfahren.

Die Einrichtung besteht aus zehn Glaskolben mit gesättigten Salzlösungen, über denen jeweils eine Glasröhre zur Aufnahme von kleinen Wägeschalen, welche die Materialproben enthalten, angeordnet ist. Die Glasröhre ist mit dem Glaskolben verbunden, sodass sich in der Glasröhre entsprechend der enthaltenen gesättigten Salzlösung und in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur eine definierte r. F. einstellt (Abbildung 4-28).



Abbildung 4-28 Glasröhre mit Proben und angeschlossenen Glaskolben mit gesättigter Salzlösung (SCHOLZ 2000)

Entgegen der EN ISO 12571, in der eine Umgebungstemperatur von 23°C vorgeschrieben ist, werden die Sorptionsisothermen bei 20°C bestimmt. Hierzu ist die gesamte Apparatur in einem Klimaraum aufgestellt, der konstant eine Temperatur von 20°C  $\pm$ 0,5°C fährt. Die verwendeten gesättigten Salzlösungen werden entsprechend SCHNEIDER 1960 angewendet und sind mit den zugehörigen Luftfeuchten bei 20°C in Tabelle 4-5 aufgelistet.

Tabelle 4-5 Verwendete Salze und zugehörige r. F. über der gesättigten Lösung bei 20°C (nach SCHNEIDER 1960)

Salz		r. F. über der gesättigten Lösung bei 20°C
Summenformel	Name	
LiCl	Lithiumchlorid	12 %
MgCl <sub>2</sub>	Magnesiumchlorid	33 %
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kaliumcarbonat	44 %
NaBr	Natriumbromid	58 %
NaCl	Natriumchlorid	75 %
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ammoniumsulfat	81 %
KCl	Kaliumchlorid	86 %
ZnSO <sub>4</sub>	Zinksulfat	90 %
(NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Ammoniumdihydrogenphosphat	93 %
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kaliumsulfat	98 %

Zur Beschleunigung des Vorgangs bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte kann die gesamte Apparatur evakuiert werden. Der Restdruck in der Apparatur beträgt nach dem Abpumpen noch 10 Torr (= 133 mbar). Die Druckabsenkung über den Salzlösungen bewirkt eine nahezu reine Wasserdampf-atmosphäre in der Glasröhre, wodurch sich die Angleichzeit gegenüber der Angleichzeit bei atmosphärischem Luftdruck deutlich verringert (KOLLMANN UND SCHNEIDER 1958, SCHNEIDER 1960). Da in einer evakuierten Umgebung der Begriff Luftfeuchte missverständlich sein kann, wird in diesem Zusammenhang der Begriff Umgebungsfeuchte verwendet.

Vor Versuchsbeginn werden die verwendeten Wägeschalen (Keramik) und die mit einem Deckel verschließbaren Wägedosen (Kunststoff) gewogen. Alle Wiegeungen erfolgen mit einer Analysenwaage der Fa. Sartorius, Typ 1601 004, auf vier Nachkommastellen genau. Repräsentative Materialproben werden auf die Waageschalen verteilt. Für jede der zehn eingestellten Umgebungsfeuchten werden auf diese Weise drei Proben vorbereitet. Zur Messung der Adsorptionskurve wird das Material vor Versuchsbeginn bei 103°C über Nacht gedarrt, um auch für niedrige Umgebungsfeuchten eine Adsorption sicherzustellen. Aufgrund der geringen Menge in

Verbindung mit der sehr großen Oberfläche der geprüften Span- und Fasermaterialien kann auch ohne Zwischenwägungen sichergestellt werden, dass das Material bei der gewählten Trocknungsdauer den darrtrockenen Zustand erreicht. Anschließend wird das Material gewogen, um eine Kontrolle des darrtrockenen Bezugspunktes zur Berechnung der Feuchten am Ende des Versuchs zu erhalten.

Über eine Klimatisierungszeit von zwei Wochen hinweg wird das Material nun zur Ermittlung der Adsorptionskurve in den evakuierten Glasröhren über den gesättigten Salzlösungen gelagert. Die Klimatisierungszeit wird bewusst großzügig bemessen, um auf Zwischenwägungen verzichten zu können. In KOLLMANN UND SCHNEIDER 1958 wird beschrieben, dass Massivholzklötzchen mit einem Volumen von ca.  $12 \text{ cm}^3$  unter den beschriebenen Bedingungen im Bereich mittlerer Feuchten bereits nach 36 Stunden das Gleichgewicht erreicht hatten. In Anbetracht der dazu vergleichsweise sehr geringen Probenmassen und der großen Oberfläche der Materialien kann die gewählte Klimatisierungszeit als in jedem Fall ausreichend angesehen werden. Nach Ende der Klimatisierung werden die Proben entnommen und gewogen. Anschließend werden die Materialien in einem evakuierten Exsikkator für zwei Wochen über  $\text{H}_2\text{O}$  (entspricht 100 % Umgebungsfeuchte) gelagert, um als Ausgangspunkt für die im Folgenden aufzunehmende Desorptionskurve einen definierten Startpunkt zu erhalten, der auch im Bereich hoher Luftfeuchten eine eindeutige Desorption sicherstellt. Nach einer erneuten Wiegung erfolgt nun wieder die Einlagerung über den gesättigten Salzlösungen für weitere zwei Wochen. Nach Ablauf der Klimatisierungszeit werden die Proben erneut gewogen und anschließend bei  $103^\circ\text{C}$  über Nacht gedarrt. Die darrtrockene Masse nach Versuchsende wird mit der darrtrockenen Masse zu Versuchsbeginn abgeglichen und dient schließlich als Bezugsmasse zur Ermittlung der Materialfeuchte bei Adsorption und Desorption für die unterschiedlichen Klimate.

#### 4.2.1.8 Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (in Anlehnung an DIN EN ISO 12572)

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  ist eine dimensionslose Kenngröße und gibt an, wievielfach größer der Widerstand eines Stoffes gegen einen Wasserdampfdiffusionsstrom ist, verglichen mit dem Widerstand einer gleich dicken Schicht ruhender Luft bei derselben Temperatur. Sie stellt also den Quotienten aus dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft  $\delta_a$  und dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten des Stoffes  $\delta_p$  dar. Durch den Bezug auf  $\mu_{\text{ruhende Luft}}$  als kleinstmöglichem Wasserdampfdiffusionswiderstand kann die Kenngröße  $\mu$  Werte zwischen 1, d. h. keine Behinderung des Wasserdampfdiffusionsstromes, die größer ist als die ruhender Luft und  $\infty$ , d. h. es liegt ein absolut diffusionsdichtes Material vor, annehmen. Als absolut diffusionsdicht können nur Metalle und Glas bezeichnet werden, alle anderen Materialien sind mehr oder weniger diffusionsoffen. Durch Multiplikation von  $\mu$  mit der Probendicke erhält man die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  [m], die ausdrückt, wie dick eine ruhende Luftschicht gleicher Temperatur ist, die dem Wasserdampfdiffusionsstrom den gleichen Widerstand entgegengesetzt wie das geprüfte Material.

Die Ermittlung der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten  $\delta_a$  und  $\delta_p$  wird nach DIN EN ISO 12572 vorgenommen. Der in einem geeigneten Prüfgefäß eingebaute Prüfkörper wird dabei über seiner Probenhöhe einem Wasserdampfdruckgefälle ausgesetzt, was zur Ausbildung eines Wasserdampfdiffusionsstromes von der relativ feuchteren hin zur relativ trockeneren Umgebung führt, der materialspezifisch behindert wird (Abbildung 4-29). Als treibendes Potential wird im Prüfgefäß an der Probenunterseite ein Differenzklima erzeugt, in dem entweder über ein Trockenmittel oder, analog dem Verfahren zur Bestimmung der Sorptionsisothermen über gesättigten Salzlösungen, eine definierte Luftfeuchtigkeit eingestellt werden kann. Durch zyklische Wiegungen der Gesamtmasse von Probenkörper und Prüfgefäß mit Trockenmittel respektive gesättigter Salzlösung, kann die Gewichtszunahme oder -abnahme bestimmt und so ein stationärer Wasserdampfdiffusionsstrom nachgewiesen werden, aus dem sich bei bekannten Umgebungsbedingungen die entsprechenden

Kennwerte berechnen lassen. Bezüglich des Abbruchs der Messung und der nötigen Anzahl an Wiegeintervallen zum Nachweis der Konstanz des Wasserdampfdiffusionsstromes in der Probe werden die Kriterien entsprechend Punkt 7.3 der DIN EN ISO 12572 angewendet.

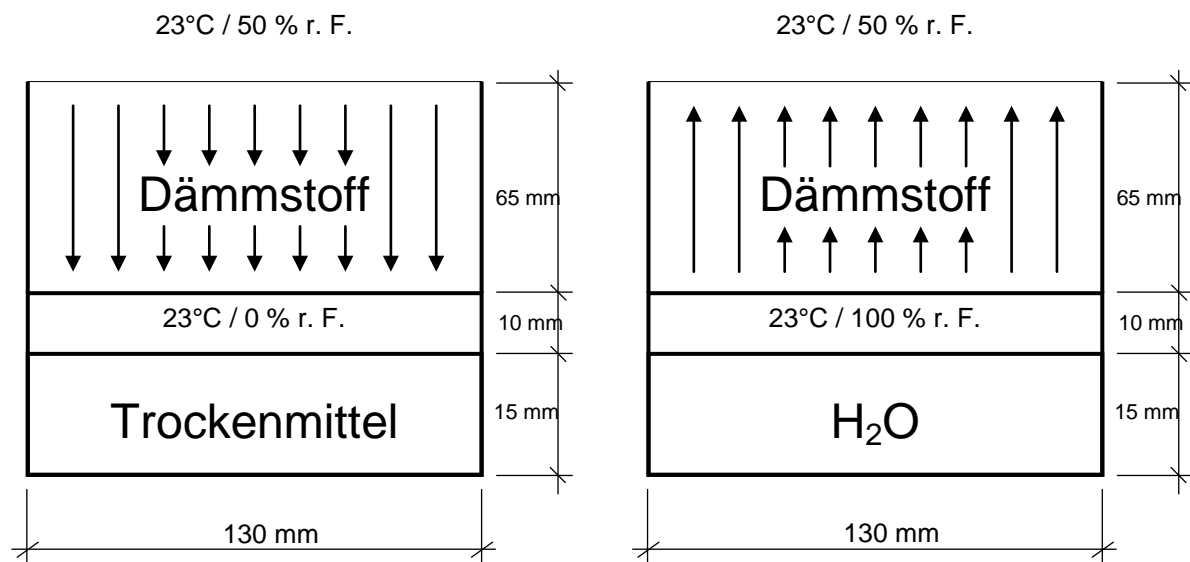


Abbildung 4-29 Prinzipskizze zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes mittels Prüfgefäßverfahren und relevante Abmessungen der verwendeten runden Prüfgefäße; Links: Prüfbedingung A; Rechts: in Anlehnung an Prüfbedingung C

Anhang B der DIN EN ISO 12572 enthält Vorgaben zu Verfahren, die für die Prüfung loser Füllstoffe geeignet sind. Neben der allgemeinen Ausbildung des Prüfgefäßes wird hier insbesondere eine Mindestdicke der Probe von 100 mm gefordert, um die Unsicherheit bei der Messung der Höhe dieser Materialien zu begrenzen. Diese Vorgabe muss jedoch auch im Zusammenhang mit Punkt 6.2.2 der Norm, in der das Verhältnis der Prüffläche in Bezug auf die Probendicke geregelt ist, gesehen werden. Der Durchmesser von kreisförmigen Probekörpern muss demnach mindestens zweimal so groß sein wie die Probekörperdicke. Bereits vorhandene kreisförmige Prüfgefäße zur Aufnahme loser Füllstoffe wiesen bei einem Durchmesser von 130 mm eine Höhe von 30 mm auf. Bei feineren Span- und Fasermaterialien lassen sich auch mit dieser Probenhöhe durchaus reproduzierbare Materialkennwerte ermitteln. Die verhältnismäßig großen Partikel des FES bewirken jedoch im eingebrachten Zustand, in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis, gerade in den Randbereichen die Ausbildung von makroskopischen Hohlräumen in der Materialstruktur, was die rechnerische Probenhöhe signifikant beeinflussen würde. Um diesem Effekt entgegenzuwirken und sich allgemein näher an der Norm zu orientieren, wurden die Gefäße mit Aufsätzen versehen, die die Höhe auf den, bezogen auf den Durchmesser, maximal zulässigen Wert von 65 mm erhöhen. Eventuelle Undichtigkeiten am Übergang vom Aufsatz zur Prüfkörperunterlage sind in Anbetracht der erwartungsgemäß sehr diffusionsoffenen Materialien vernachlässigbar.

Als Prüfumgebung wird entsprechend Punkt 7.1 der Norm die Prüfbedingung A (trockenes Prüfgefäß) gewählt. Im Weiteren wird in Anlehnung an Prüfbedingung C (nasses Prüfgefäß) geprüft. Hierbei wird aber in Abweichung zu Punkt 7.1 durch Lagerung der Proben über Wasser eine Luftfeuchte von 100 % eingestellt, da die Verwendung von gesättigten Salzlösungen insgesamt aufwändiger ist und eine geringere Genauigkeit erzeugt, als die Lagerung über Wasser.

Das verwendete Trockenmittel ist Orange Gel der Fa. Merk. Die Messung der Temperatur- und Luftfeuchte in der Klimakammer erfolgt über einen kalibrierten Datenlogger der Fa. Rotronic. Der barometrische Luftdruck wird vor und nach jeder Wägung bei der Wetterstation der LMU München in

der Theresienstraße online abgerufen. Die minimalen Wägeintervalle und Abbruchkriterien zur Messung werden entsprechend Punkt 7.3 der DIN EN ISO 12572 bestimmt und kontrolliert. Das angestrebte Genauigkeitsniveau, als Grundlage der Berechnung der minimalen Wägeintervalle bei bekannter Wägepräzision, wird auf 5 % angesetzt. Die Berechnungen zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten sind der Norm zu entnehmen. Zu beachten ist, dass die in der Norm angegebene Schirmer'sche Formel (EN ISO 12572, Punkt 8.6, Formel (7)) mit dem Faktor  $1/3600$  multipliziert werden muss, um die dort angegebene Einheit für  $\bar{\delta}_a$  [ $\text{kg}/(\text{m}^*\text{s}*\text{Pa})$ ] zu erhalten (BADER 2005).

Die in dem Probehälter eingesetzte Drahtgaze stellt einen Widerstand für den Wasserdampfdiffusionsstrom dar, der bei der Berechnung des Wasserdampf- Durchlasswiderstandes  $Z_s$  (Probekörper allein) berücksichtigt werden muss. Entsprechend Anhang B.4 der DIN EN ISO 12572 wird deshalb für jeden Probehälter eine Leermessung durchgeführt und der Wert  $Z_m$  (Membran allein) zur Korrektur des später gemessenen Wertes  $Z_t$  (Membran und Probe) durch Differenzbildung ( $Z_s = Z_t - Z_m$ ) verwendet. Da der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Materialien sehr gering ist ( $s_d < 0,2 \text{ m}$ ), wird der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient  $W$  auch von der Luftschicht zwischen Trockenmittel und Probenkörperunterseite beeinflusst. Für die weiteren Berechnungen werden deshalb die für  $W$  gemessenen Werte entsprechend Anhang G.1 der DIN EN ISO 12572 auf  $W_c$  korrigiert. Die Luftschicht zwischen Trockenmittel und Probenkörperunterseite beträgt bei der verwendeten Anordnung 10 mm.

#### 4.2.1.9 Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes (DIN EN 29053)

Der Strömungswiderstand wird nach DIN EN 29053 im Gleichstromverfahren bestimmt. Hierbei wird das in einen Messzylinder eingebaute Material mit einer kontrollierten und gerichteten Luftströmung durchströmt und die dabei auftretende Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten des Probekörpers gemessen. Eine Prinzipskizze des angewendeten Verfahrens ist in Abbildung 4-30 dargestellt.

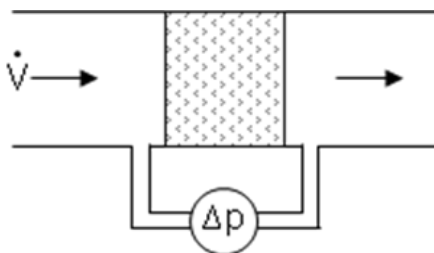


Abbildung 4-30 Prinzipskizze des Gleichstromverfahrens zur Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstands nach DIN EN 29053

Die realisierte Messanordnung besteht aus einem zylindrischen Probehälter mit einem Innendurchmesser von 100 mm. Das Material wird nach unten und oben hin von einer Lochblechauflage begrenzt. Die obere Begrenzung ist als in der Höhe verstellbarer Druckstempel ausgeführt, sodass definierte Einbringdichten erzeugt werden können. Der Volumenstrom wird über einen präzisionsdruckgeminderten Druckluftanschluss bereitgestellt, der mittels einer speziellen Mess- und Regelungstechnik der Fa. Special Instruments gemessen und geregelt wird. Der Differenzdruck zur Atmosphäre wird 10 cm unterhalb der Prüfkörperunterseite mittig zentriert abgegriffen und über eine Differenzdruckmessdose der Fa. Special Instruments erfasst. Der Messfehler der Volumenstrom- und Druckmessung erfüllt die Anforderungen der DIN EN 29053. Die vorgeschriebene Genauigkeit von  $\pm 5 \%$  des angezeigten Wertes ist für den Bereich von 20 – 500 Pa bei der Druckmessung und 0,5 – 25  $\text{Nl}/\text{min}$  bei der Volumenstrommessung erfüllt und wird über Kalibrierzertifikate nachgewiesen.

Zur Messung wird der Probenhalter mit homogen aufbereiteten und im Raumklima bis zur Gewichtskonstanz ausklimatisierten Materialproben befüllt. Die erforderliche Feuchtmasse ermittelt sich aus dem zu befüllenden Volumen (Starthöhe im Probenhalter: 200 mm), der Materialfeuchte (mit der Schnelldarrwaage bestimmt) und der Startdichte. Das Material wird homogen eingefüllt, anschließend wird der Druckstempel aufgesetzt und die Materialsäule auf die Starthöhe komprimiert.

Der Strömungswiderstand eines Materials wird mit steigender linearer Strömungsgeschwindigkeit größer (DIN EN 29053). Deshalb wird der Strömungswiderstand einheitlich auf eine Strömungsgeschwindigkeit von  $u = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  bezogen. Um diese Strömungsgeschwindigkeit im Probenhalter einzustellen, müsste der Durchmesser des Probenhalters, mit Bezug auf den minimal einstellbaren Volumenstrom von 0,5 NI/min, 0,146 m betragen, was prinzipiell realisierbar wäre. Allerdings werden mit sinkenden linearen Strömungsgeschwindigkeiten auch die zu messenden Druckdifferenzen sehr niedrig, was dazu führt, dass der Fehler der Druckmessung überproportional steigt. Aus diesen und aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messungen mit der in früheren Projekten verwendeten Probenhaltergeometrie (WEGENER et al. 2004) wird der auf  $u = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  bezogene Strömungswiderstand aus einer Reihe bei steigenden Strömungsgeschwindigkeiten aufgenommener Messwerte extrapoliert. Zu diesem Zweck werden über dem Zusammenhang, Strömungswiderstand aufgetragen über der Strömungsgeschwindigkeit, unterschiedliche Regressionsmodelle (linear, polynomisch, logarithmisch) auf das zu erzielende Bestimmtheitsmaß geprüft und mit der bestbestimmten Funktion auf den Wert bei  $u = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  extrapoliert. In Abhängigkeit der Materialcharakteristik können die Punkte der Strömungsgeschwindigkeit, für die der zugehörige Druckabfall bestimmt werden kann, variieren. Mit dieser Methode wird für jede Probe bei einer Reihe von Einbringdichten, die durch eine Komprimierung des Materials über den oberen Druckstempel eingestellt werden, der Strömungswiderstand gemessen und als längenbezogener Strömungswiderstand  $r \text{ [Pa} \cdot \text{s/m}^2]$  dargestellt. Je Material werden auf diese Weise fünf Einzelproben gemessen.

#### 4.2.1.10 Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit

Die Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit wurde vom Institut für Holztechnologie in Dresden (ihd) durchgeführt. Das Material wurde nach dem ihd-Werkstandard VA-20-24 in Anlehnung an DIN EN 60068-2-10:2006 geprüft. Hierbei wird das Material mit einem Gemisch aus Schimmelpilzsporen beimpft und unter Bedingungen inkubiert, die das Auskeimen und Wachsen der Schimmelpilze fördern. Der Schimmelpilzbewuchs wird nach 14 und 28 Tagen anhand von fünf Einzelproben nach einem festgelegten Bonitierungsschema (Tabelle 5-42) bewertet (PLASCHKIES 2009). Der Mittelwert der Einzelbeobachtungen nach 28 Tagen je Materialvariante wird schließlich zur Bewertung herangezogen. Die Inkubationsbedingungen und die verwendeten Prüfpilze sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-6 Prüfbedingungen und verwendete Prüfpilze zur Bestimmung der Schimmelpilzbeständigkeit in Anlehnung an DIN EN 60068

Inkubation:	28 Tage bei 28 °C, > 95 % r. F.
Prüfpilze:	Aspergillus niger
	Penicillium funiculosum
	Trichoderma viride
	Paecilomyces variotii
	Chaetomium globosum
Sporenkonzentration:	ca. $1 \times 10^6$ Sporen/ml



#### 4.2.2 Beschreibung spezifisch entwickelter Methoden

Im folgenden Abschnitt werden Methoden beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit auf Basis interner Vorversuche sowie der Bewertung früher angewendeter Prüfaufbauten und einer Auswertung der hierzu vorhandenen Literatur entwickelt wurden. Insofern damit ein relevanter Beitrag zum Verständnis der Prüflogik geboten ist, wird der eigentlichen Methodenbeschreibung auch eine Dokumentation des Entwicklungsprozesses vorangestellt.

##### 4.2.2.1 Entwicklung einer Methodik zur Prüfung der Volumenstabilität von losen Dämmstoffen auf einem Kleinprüfstand

Im Rahmen der Methodenfindung zur Ermittlung der Volumenstabilität auf einem Kleinprüfstand in Anlehnung an die Kurzprüfeinrichtung des ifW in Stuttgart wurden unterschiedliche Formen der Schwingungsbelastung an einen mit Dämmstoff befüllten Plexiglaszylinder (Durchmesser 191 mm, Höhe 500 mm) angelegt. Im Weiteren wurde der Einfluss unterschiedlicher Einstreuhöhen und variierender Auflagergewichte sowohl auf das Verdichtungsergebnis als auch auf die Ausprägung von Dichteprofilen über die Zylinderhöhe untersucht. Der Einfluss unterschiedlicher Materialmassen auf die sich einstellenden Schwingungsbelastungen wurde ebenfalls dokumentiert.

Zur Verfügung stand eine auf Schwingmetallen (Elastomerlager) gelagerte 500 mm x 500 mm große Tischfläche, an die unterschiedliche Erregerkräfte angekoppelt werden können. Ein unwuchterregter Kreisrüttler und ein oszillierender Druckluftzylinder wurden so im Hinblick auf die erzeugten Schwingungsformen und auf das Setzungsverhalten des Dämmstoffes untersucht. Die Beschleunigungen wurden mit einem Beschleunigungsaufnehmer der Fa. Kistler, Typ 8610B100, der auf der Grundplatte des Systems montiert war, erfasst und mit Hilfe des Messdatenerfassungsprogramms DIADEM der Fa. National Instruments einer Frequenzanalyse durch eine Fast-Fourier-Transformation unterworfen. Bei der gewählten Abtastrate von 2000 Hz kann ein Frequenzspektrum bis 1000 Hz analysiert werden und als Übertragungsfunktion graphisch dargestellt werden. Das Ziel war, eine reproduzierbare und praxisgerechte Belastungsform zu finden, die ein ausreichendes Differenzierungspotential bietet. Die Ergebnisse werden im Folgenden qualitativ wiedergegeben.

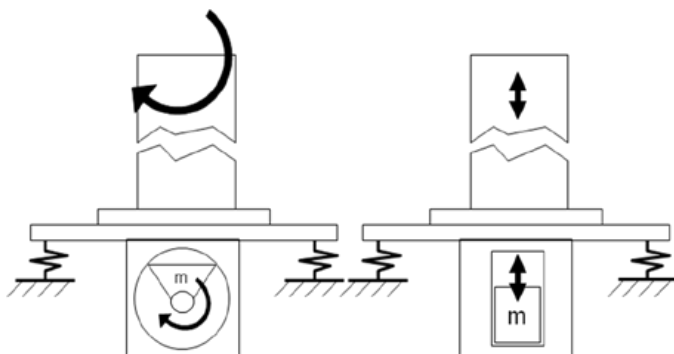


Abbildung 4-31 Links: Krafteinleitung mit dem Kreisrüttler, Rechts: Krafteinleitung mit dem Druckluftzylinder

Mit dem Kreisrüttler entspricht der untersuchte Aufbau einer Verkleinerung des von Vogel 1999 entwickelten Prüfstandes, unter der Einschränkung, dass die Probenhaltergeometrie zylinderförmig ist und keine Kastenform darstellt. Im unbelasteten Zustand stellt sich am Tisch sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung eine gleichmäßige Sinusschwingung ein, die aber auch nicht über alle Frequenzbereiche erhalten bleibt. Der Tisch läuft also in dem mittels Handpotentiometer durchfahrbaren Frequenzspektrum von 30 Hz – 80 Hz auch im unbelasteten Zustand nicht immer stabil.

In Abbildung 4-32 sieht man die Übertragungsfunktion des Rütteltisches bei Anregung mit 49 Hz im unbelasteten Zustand. Als Hauptauschlag ist deutlich der flinke und nur schwach gedämpfte Peak bei 49 Hz zu erkennen. Einige überlagerte Frequenzen finden sich noch im Bereich zwischen 800 Hz – 1000 Hz, sind aber quantitativ vernachlässigbar. Das System folgt stabil der Anregung.

Wird der Tisch nun mit der Prüfeinrichtung, die aus dem beschriebenen Plexiglaszylinder besteht, der auf einer mit dem Tisch fest verschraubten Grundplatte aus Acrylglas verklebt ist, was eine ideal steife Anbindung zumindest im unteren Fußbereich des Aufbaus gewährleistet, belastet und mit der gleichen Schwingung angeregt, lassen sich unterschiedliche Probleme beobachten. Durch die seitliche Pendelbewegung des Prüfzylinders, die sich aus der horizontalen Komponente der Kreisbewegung erklärt, wird das Auflagergewicht, welches aus zwei im Abstand von etwa fünf Zentimetern verklebten Plexiglasplatten besteht, die ein Verkippen des Gewichtes im Zylinder verhindern sollen und so einen gleich bleibenden Druck auf das Material gewährleisten, bei bestimmten Frequenzen angehoben, was zu einer Entlastung des Materials führt. Im Weiteren sind Bereiche ausgeprägten Resonanzverhaltens zu beobachten, was beim Zylinder selbst zu einer überproportionalen Belastung an der Grenze zur Zerstörung der Verklebung führt.

Ebenso muss festgestellt werden, dass sich die gemessenen Schwingungen im Vergleich zum unbelasteten Zustand deutlich verschieben, wie in Abbildung 4-33 zu erkennen ist. Der Maximalpeak liegt nicht mehr bei den eingeleiteten 49 Hz, sondern verschiebt sich in einen Bereich von ca. 30 Hz, während in dem Frequenzbereich von 50 Hz – 1000 Hz ein undefiniertes Spektrum an überlagerten Schwingungen entsteht.

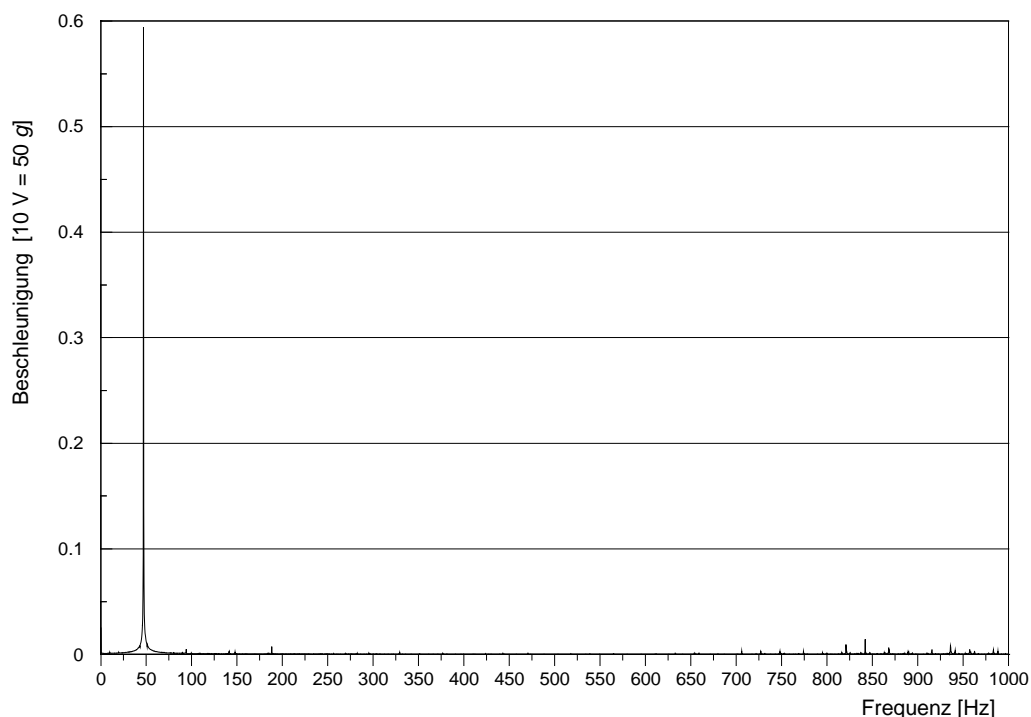


Abbildung 4-32 Übertragungsfunktion des Rütteltisches bei Anregung mit 49 Hz (Abbildung zeigt vertikale Messung, horizontal entsprechend)

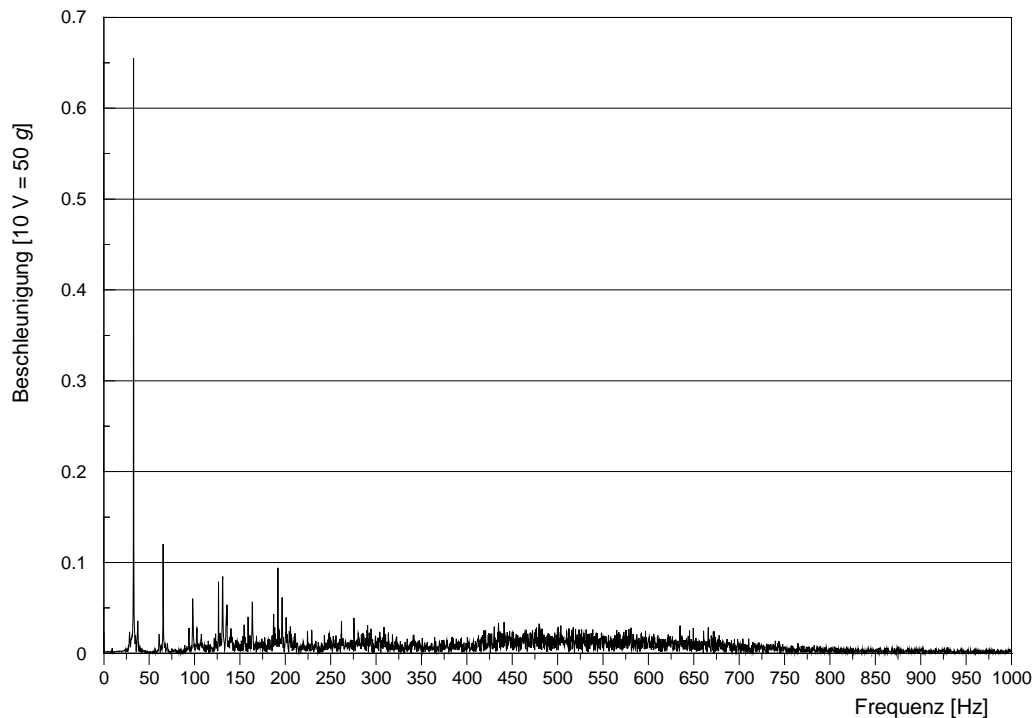


Abbildung 4-33 Übertragungsfunktion des Rütteltisches bei Anregung mit 49 Hz im belasteten Zustand (Prüfzylinder befüllt mit Altpapierflocken 09)

Hier wird die Forderung nach einer klar definierten reproduzierbaren und quantifizierbaren Schwingungsbelastung nicht mehr erfüllt, da Massenveränderungen durch unterschiedliche Streudichten, aber auch eine Veränderung der Frequenz, beispielsweise beim Durchfahren definierter Frequenzbereiche, zu unkontrollierten Verschiebungen und Erweiterungen der beteiligten Frequenzen führen, zumal der Bereich von 50 Hz – 1000 Hz ohnehin nicht quantifiziert werden kann. Die Erklärung hierfür folgt der bereits geführten kritischen Betrachtung der Prüfeinrichtung von VOGEL 1999 (siehe Punkt 3.1.1.2).

In Laborversuchen konnte in früheren Projekten nach der Materialbeanspruchung im Gefach tendenziell eine Abnahme der Dichte über der Höhe beobachtet werden – die größten Dichten waren unten, die kleinsten oben zu finden. Um diese Verhältnisse für den in Abb. 3 dargestellten Versuchsaufbau zu klären, wurde die nach Abschluss der Versuche vorliegende Dämmstoffhöhe (Material: Altpapierflocken 09) gedrittelt, markiert und die entstehenden Schichten vorsichtig abgetragen und ausgewogen, um so die Dichteverteilung über der Gefachhöhe berechnen zu können. Bei der betrachteten Anordnung fanden sich die größten Dichten oben und die geringsten unten, obwohl sich, qualitativ beurteilt, ein deutliches Absetzen des Feinanteils beobachten ließ, was die Dichte in den unteren Bereichen eigentlich erhöhen sollte. Der Effekt lässt sich aber über die Beanspruchung durch das Auflagergewicht erklären.

Auf eine unbelastete und durch die Gefachwandungen räumlich begrenzte Materialsäule von Spänen wirkt in der obersten Spanschicht keine Kraft ein, da das Material praktisch lose aufliegt. Die unterste Schicht wird durch die Masse aller darüber liegenden Späne belastet. Die Beanspruchung ist also abhängig von der Gefachhöhe, wobei ein Abstützungseffekt an den Innenwänden zu einer Entlastung führt, die wieder abhängig ist von der Rauigkeit der Innenwand. Im vorliegenden Fall wird die zylindrische Spansäule aber vor und während der Vibrations- oder Rüttelbelastung durch ein Auflagergewicht belastet, das die Masse der eingebrachten Spansäule in jedem Fall deutlich übersteigt. Stellt man sich nun die zusammenhängenden Späne über der Höhe als in alle Richtungen untereinander und zur Innenwand des Zylinders miteinander verschaltete Federn vor, so nimmt die

Steifigkeit des Systems nach unten hin zu. Die größte Abstützung erfährt bei der vorliegenden Zylindergeometrie also stets der untere Teil, während der Auflagerlast, die für die Verdichtung aber bestimmend ist, von den weiter oben liegenden Materialschichten weniger Widerstand entgegengesetzt wird. Mit sukzessiv erhöhter Auflagerlast müssten sich also nicht nur die mittleren Setzungsdichten, sondern auch die Variationskoeffizienten der Dichteunterschiede erhöhen, was in Tabelle 4-7 auch gut zu erkennen ist.

Tabelle 4-7 Variationskoeffizienten des Dichtegefälles in Abhängigkeit unterschiedlicher Auflagermassen (Material: Altpapierflocken 09; Einstreuhöhe 500 mm, Kreisrüttler)

Auflagermasse	279	555	848	2902	5499
V	4,8 %	8,6 %	9,9 %	12,1 %	14,1 %

Neben der Größe der Auflagerbelastung ist auch die Einstreuhöhe im unverdichteten Zustand entscheidend für die Ausbildung des Dichteprofiles. Bei Versuchen mit voller (500 mm) und halber Einstreuhöhe (250 mm) zeigte sich, dass die Verdichtung bei 250 mm Dämmstoffsäule im Startzustand gleichmäßiger erfolgte. Der Variationskoeffizient des Dichtegefälles betrug hier ca. 5,5 %, bei doppelter Einstreuhöhe ca. 7,5 %.

Stellt man im Weiteren auch die absoluten Dichten des oberen, mittleren und unteren Drittels, bezogen auf den verdichteten Zustand nach Versuchsablauf, bei einer Starteinstreuhöhe von 500 mm den Werten bei 250 mm Einstreuhöhe gegenüber (siehe Tabelle 4-8), so ist außerdem zu erkennen, dass die Abstände der Mittelwerte aus drei Versuchen innerhalb einer Schicht von oben nach unten abnehmen (Differenzen  $[kg_{atro}/m^3]$ : Oben: - 2,6, Mitte: 1,0, Unten: 0,5). Dies unterstützt ebenfalls die These eines nach unten hin nachlassenden Abstützungseffektes an der Prüfzylinderinnenwand, der umso ausgeprägter auftritt, je höher und damit schlanker die geprüfte Materialsäule wird.

Tabelle 4-8 Gemittelte Schichtdichten des oberen, mittleren und unteren Drittels nach der Verdichtung bei unterschiedlichen Einstreuhöhen im Startzustand (Material: Altpapierflocken 09, Auflagergewicht 500 g, je Einstreuhöhe drei Versuche, Kreisrüttler)

	Einstreuhöhe 500 mm	Einstreuhöhe 250 mm
	$[kg_{atro}/m^3]$	$[kg_{atro}/m^3]$
oberes Drittel	57,8	55,2
mittleres Drittel	54,4	55,4
unteres Drittel	49,8	50,3

Die vorliegenden Ergebnisse sind relevant, wenn man eine reproduzierbare Methodik zur Ermittlung der Volumenstabilität erhalten will. Bei Vergleich unterschiedlicher Materialien, müssen auch die sich stark unterscheidenden Streudichten berücksichtigt werden. Legt man stets die gleiche Masse an Dämmstoff vor, werden bei gleichem Zylinderquerschnitt stark unterschiedliche Einstreuhöhen auftreten, mit dem die beschriebenen Effekte einhergehen. Nebenbei bemerkt ist auch bei gleicher statischer Masse der Anteil der dynamisch wirksamen Masse in hohem Maße abhängig vom Grad der Anfangsverdichtung sowie dem Verdichtungsverlauf über der Zeit, der wieder ein Materialspezifika darstellt. So wird beispielsweise in der Betonverdichtungstechnik am Anfang der Rüttelbeanspruchung nur ca. 10 % - 15 % der Schüttgutmasse zur dynamischen Masse dazugerechnet, wobei sich der Anteil mit zunehmender Verdichtung erhöht (WAMBACH UND SCHNEIDER 1992).

Um die Schwingungsbelastung auf einen einachsigen Bewegungszustand zu vereinfachen wurden an dem gleichen Rütteltisch auch oszillierende Druckluftzylinder montiert, bei denen ein auf- und

abfahrender Metallstößel eine lineare Bewegung verursacht und an den Umkehrpunkten eine impulsartige Lasteinleitung bewirkt. Einerseits sollten so überhöhte Pendelbewegungen in seitlicher Richtung, wie sie beim Kreisrüttler auftreten, vermieden werden, andererseits entspricht der Lastimpuls in den Umkehrpunkten einer Aufstoßbeschleunigung, wie sie auch bei den Fallversuchen auftritt. Hierbei konnten in früheren Versuchen die größten Setzungen beobachtet werden. Zudem hat eine Stoß- oder klopfartige Bewegung durchaus Praxisrelevanz. Bei der Montage vorgefertigter Wandelemente auf der Baustelle treten stets Belastungen durch ruckartiges Absetzen mit dem Kran, Hammerschläge beim Fügen der Eckverbindungen, etc. auf.

Die Druckluftzufuhr ließ sich in einem Bereich von 1,5 bar bis knapp 6 bar regeln, wobei die untere Grenze den Minimaldruck darstellt, den der Zylinder benötigt, um in Funktion treten zu können. Die gemessenen Schwingungsantworten waren über den betrachteten Druckluftbereich hinweg insgesamt ausgeglichener, als dies bei den sukzessiv vorgenommenen Frequenzerhöhungen beobachtet wurde.

Vergleicht man Abbildung 4-34 mit Abbildung 4-35, so fällt auf, dass die Frequenzbereiche, in denen ein Ausschlag zu beobachten ist, im Wesentlichen gleich bleiben. Bei um 2 bar erhöhtem Druck vergrößern sich die Amplituden und es kommen höhere Frequenzen hinzu. Ausgehend vom geringsten Druck, erweitert sich das Frequenzspektrum bei steigender Belastung kontinuierlich in den höherfrequenten Bereich hinein, die Belastungsspitzen verschieben sich aber nicht.

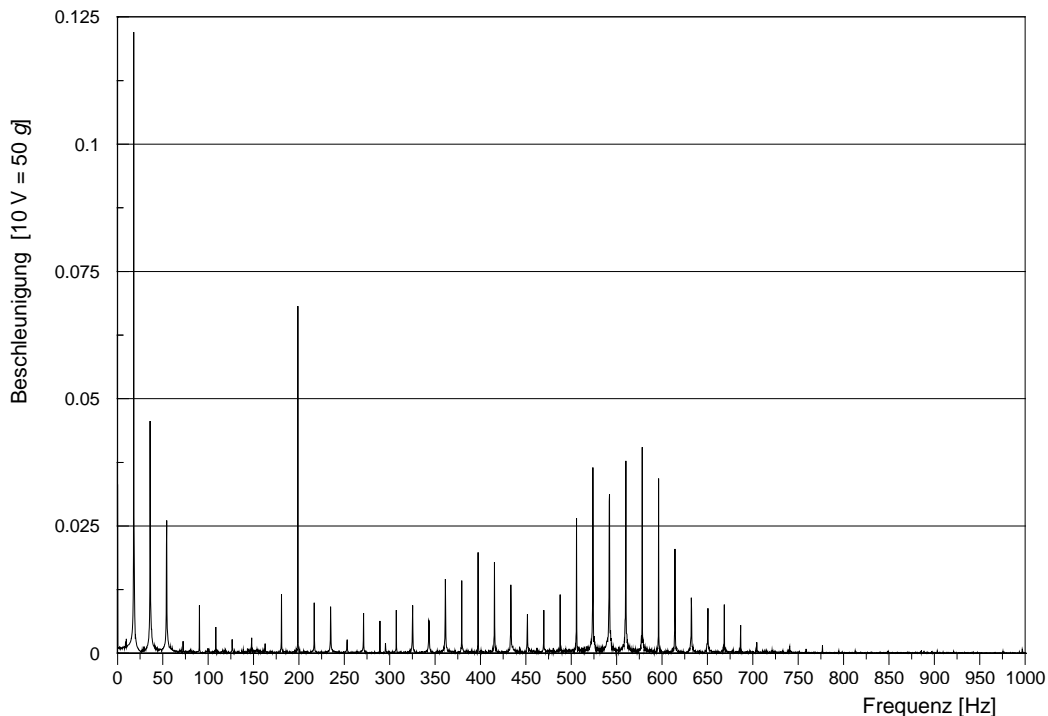


Abbildung 4-34 Frequenzspektrum bei oszillierendem Druckluftzylinder und 4,0 bar Druck

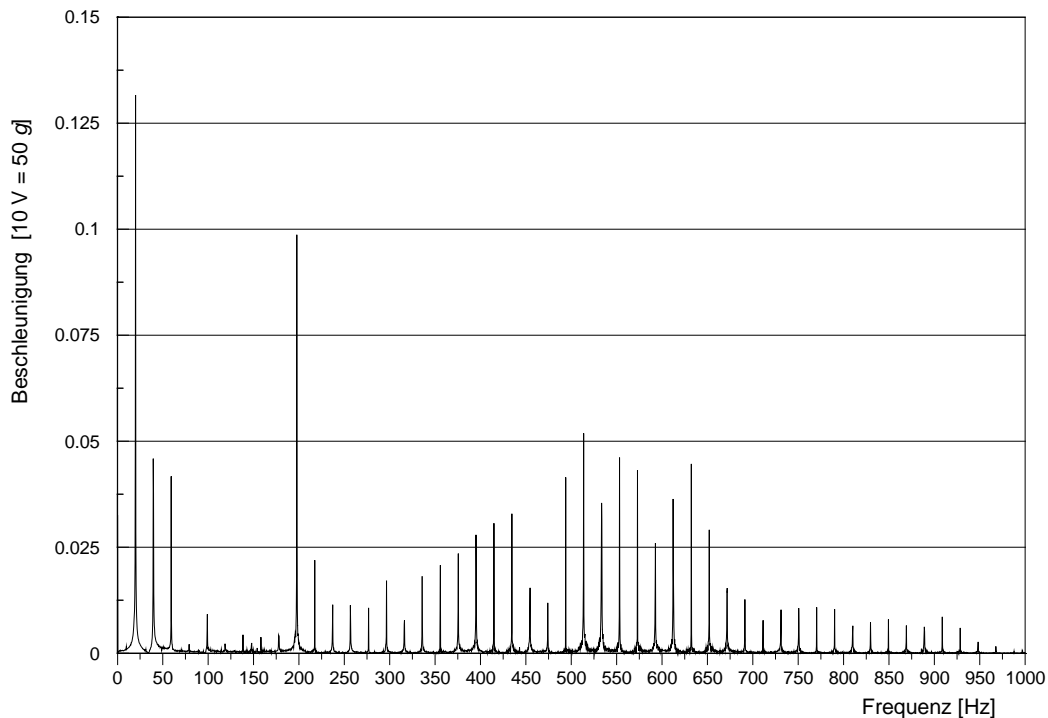


Abbildung 4-35 Frequenzspektrum bei oszillierendem Druckluftzylinder und 6,0 bar Druck

Das Verdichtungsergebnis des Materials war bei der vorliegenden linearen Beanspruchung geringer als bei Anregung mit dem Kreistrüttler, was bei den geringeren Amplituden der Beschleunigungsmessungen im Erwartungsbereich lag. Die bei WEGENER et. al 2004 beobachteten starken Verdichtungen bei den Fallversuchen (Impulsartige Laststöße) resultieren also offensichtlich vornehmlich aus der Größe der eingeleiteten Beschleunigung und nicht aus der Beanspruchungsart. Durch eine entsprechende Erhöhung der aufliegenden Masse konnten aber trotzdem die gleichen Setzungsdichten wie bei den Versuchen mit dem Kreistrüttler erreicht werden, wobei im Gegensatz zum Kreistrüttler, bei dem auch eine ausgeprägte Separierung von Feinanteil zu beobachten war, hier fast keine Separation des Materials beobachtet werden konnte.

Unter Berücksichtigung der bis hier dargestellten Zusammenhänge wurde ein optimierter Kleinprüfstand zur Ermittlung des Setzmaßes loser Dämmstoffe entwickelt. Die Basis des Systems bildet eine Siebanalysemaschine vom Typ AS 200 control der Fa. Retsch, die lineare Sinusschwingungen in vertikaler Richtung erzeugt.

Auf der Grundplatte des Gerätes wird mit einer Spannvorrichtung der mit Dämmstoff gefüllte Prüfcylinder fixiert. Eine im Gerät integrierte und kalibrierbare Mess- und Regelungstechnik bietet die Möglichkeit, entweder den durchfahrenen Schwingweg in mm oder die Beschleunigung in  $g$  ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ) zu regeln. Das Gerät läuft netzfrequenzunabhängig, weshalb sich der jeweils unregelmäßige Parameter (Amplitude oder Beschleunigung) in Abhängigkeit der Eigenfrequenz einstellt, die wiederum charakteristisch für die dynamisch wirksame Masse ist. Die relevanten Parameter Beschleunigung, Amplitude und Frequenz stehen in den Umkehrpunkten der Schwingung wie folgt in Beziehung:

$$\hat{a} = -\hat{y} \omega^2 \quad [1]$$

mit

$\hat{a}$  = Maximale Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$\hat{y}$  = Maximale Elongation (entspricht der halben Schwingweite) [m]

$\omega$  = Winkelgeschwindigkeit [1/s]

und

$$\omega = 2 \pi f \quad [2]$$

mit

$f$  = Frequenz in [1/s]

Bei einer Einfüllhöhe von 250 mm wurde ein geringes Dichtegefälle über der Höhe erzielt (Tabelle 4-8). Das schwerste Material (ein feiwürfeliger Bandsägespan) weist eine Streudichte von  $236,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  auf, was bei vorgegebener Einstreuhöhe und einer Ausgleichsfeuchte im Normklima von 14 % zu einer statischen Masse des zu prüfenden Materials von ca. 1900 g führt. Mit dieser Befüllung konnte bei einem vorgegebenen Schwingungsweg von  $A = 1,5 \text{ mm}$  noch eine Beschleunigung von  $8 \text{ g}$  erreicht werden.

Um nun bei unterschiedlichen Materialien vergleichbare Belastungen zu generieren, muss die dynamische Masse bei allen Versuchen konstant gehalten werden. Dies erfolgt durch ein Ausgleichsfach unter dem Prüfzylinder, dessen Gewicht mit einem schüttfähigen Material stufenlos eingestellt werden kann. Die Masse des Ausgleichsfachs wird nun so lange verändert, bis die Regelungstechnik bei vorgegebener Beschleunigung ( $= 8 \text{ g}$ ) die Amplitude von  $1,5 \text{ mm}$ , also den Wert der Referenzmessung des schwersten Materials erreicht. Ist dies erfüllt, so stellt sich die Frequenz entsprechend ein und es liegen identische dynamische Massen vor. Abbildung 4-36 zeigt die Anordnung schematisch.

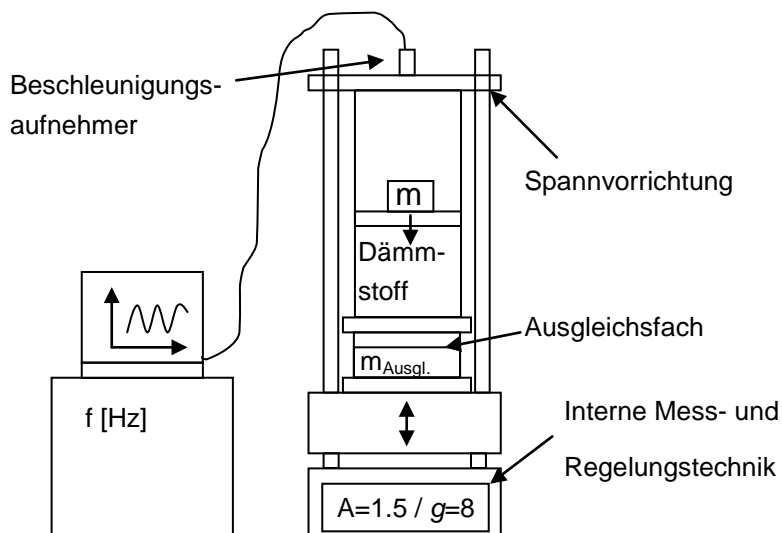


Abbildung 4-36 Prinzipskizze des Kleinprüfstandes zur Ermittlung der Volumenstabilität loser Dämmstoffe

Um die Tauglichkeit des Verfahrens zu überprüfen, wurde in den Vorversuchen mit einem externen Beschleunigungsaufnehmer auch die Frequenz gemessen. Aus den gewonnenen Daten lässt sich auch das Frequenzspektrum ermitteln, womit eine vergleichende Betrachtung der Schwingungsbeanspruchung möglich wird (Abbildung 4-37 und Abbildung 4-38).

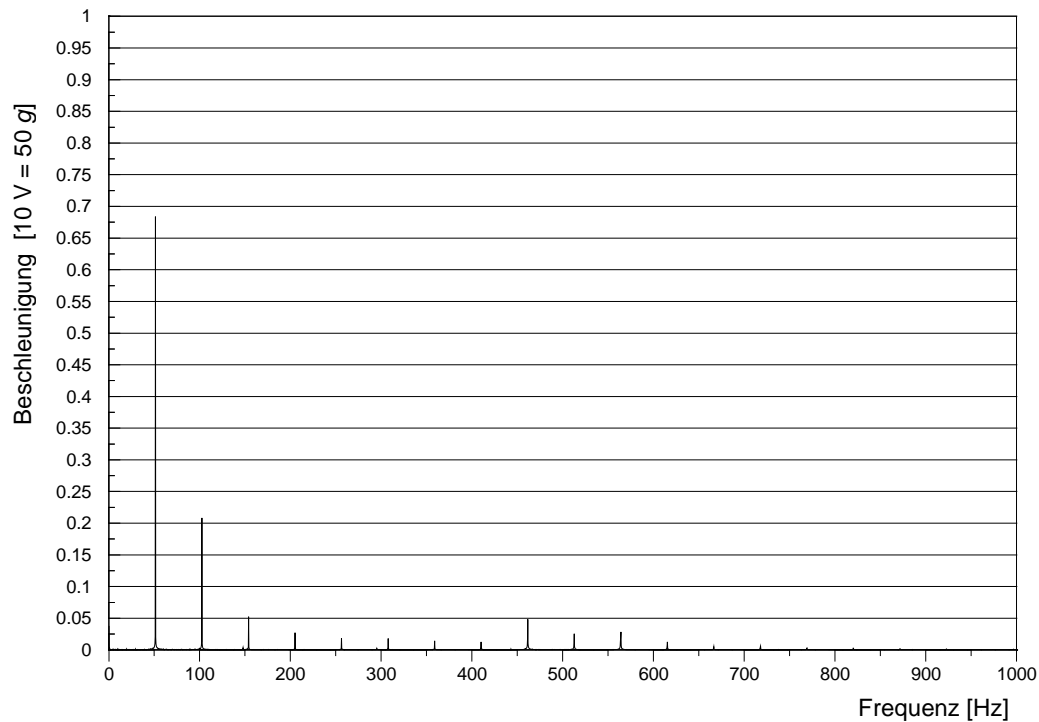


Abbildung 4-37 Frequenzspektrum: Bandsägespan (Streudichte  $236,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ), Einstreuhöhe 250 mm (mit Ausgleichsfach)

Vergleicht man das Material mit der größten Streudichte (Bandsägespan  $236,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ; Abbildung 4-37) mit dem Material mit der leichtesten Streudichte (FES  $13,7 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ; Abbildung 4-38), so kann folgendes festgestellt werden. In beiden Fällen schwingt der Zylinder mit einer Amplitude von 1,5 mm; die an der AS 200 control angezeigte Beschleunigung beträgt 8 g. Aufgelöst sollte sich also eine Frequenz von 51,48 Hz einstellen. Die gemessenen Frequenzen liegen mit 51,6 Hz und 51,3 Hz in diesem Bereich (vgl. Abbildung 4-37 und Abbildung 4-38).

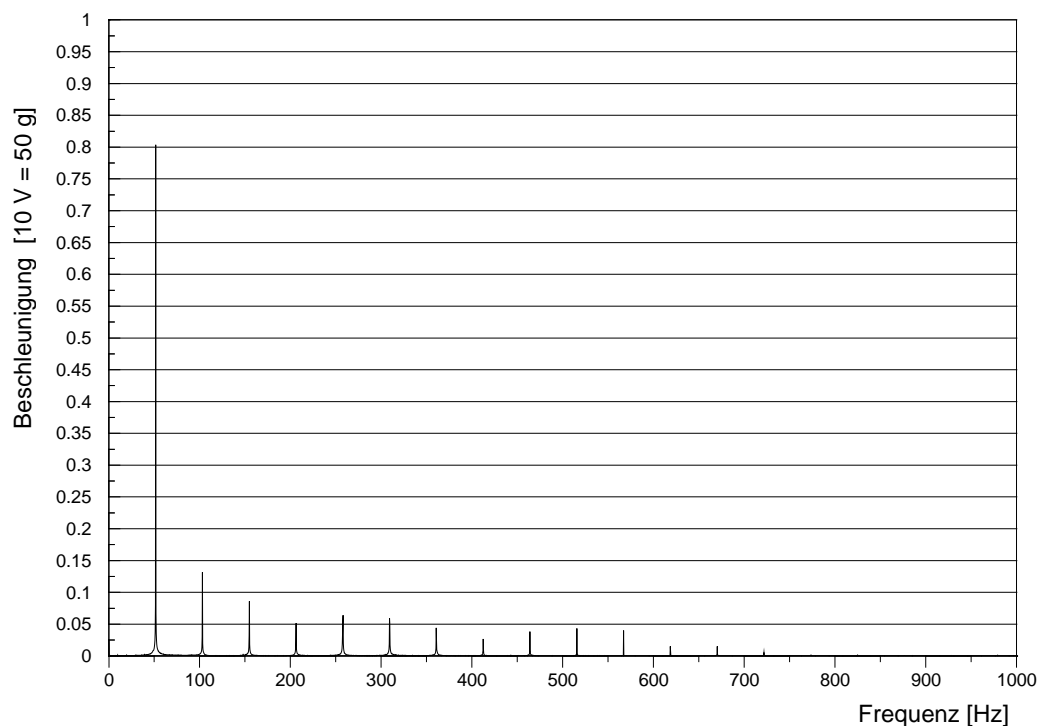


Abbildung 4-38 Frequenzspektrum: FES (Streudichte:  $13,7 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ), Einstreuhöhe 250 mm (mit Ausgleichsfach)



Unterschiede bestehen also nur noch in der Verteilung des Spektrums an überlagerten Frequenzen. Beim leichtesten Material steckt ein Großteil der dynamischen Masse im Ausgleichsfach, das aus anderem Material besteht und damit zwangsläufig auch ein anderes Schwingungsverhalten zeigt, während beim schwersten Material das Gewicht des Dämmstoffes selbst überwiegt. Dies könnte der Grund dafür sein, dass in Abbildung 4-38 ein insgesamt strafferes Antwortverhalten des Systems vorliegt. Der Maximalpeak bei 51,6 Hz ist größer als in Abbildung 4-37 und die Anteile der überlagerten Frequenzen sind schwächer.

Bei einem Vergleich unterschiedlicher Materialien bleibt diese Einschränkung aber in jedem Fall erhalten. Würde ohne Ausgleichsfach die Materialmasse konstant gehalten, verschieben sich zudem die Frequenzspektren. Weiterhin kommt dann das Problem unterschiedlicher Einstreuhöhen deutlich zum tragen. Beim Vergleich der Materialien FES 01 und Bandsägespan 03 unterscheiden sich bei gleicher eingestreuter Masse die Einstreuhöhen um den Faktor 17.

Unter Beachtung aller aufgezählten Punkte ergibt sich folgender Versuchsablauf. An einer Materialprobe des zu untersuchenden Span- oder Fasergemisches erfolgt eine Feuchtebestimmung mittels Schnelldarrwaage. Mit der Materialfeuchte und der mittleren Streudichte (bei Einzelmaterialien entsprechend der Streudichte nach 4.2.1.4) wird anschließend für eine Einstreuhöhe von 250 mm und einen Zylinderinnendurchmesser von 191 mm die feuchte Masse Span oder Faser je Prüfung berechnet. Diese Menge wird anschließend der Grundgesamtheit repräsentativ entnommen, wobei die in 4.2.1.1 beschriebenen Methoden angewendet werden. Auf diese Weise werden fünf Proben für die eigentlichen Messungen und eine Probe für die Kalibrierung der Ausgleichsmasse vorbereitet. Bei den in den Hauptversuchen untersuchten Materialmischungen ist die Bestimmung der Schüttdichte nach 4.2.1.4 schwierig. Während der Einstreuung über die Vibrationsrinne sind einerseits Separationseffekte zu beobachten – das Material fällt also auf interpartikulärer Ebene entmischt in den Prüfzylinder; andererseits sind die Mischungen nicht mehr rieselfähig, es fallen also eher nacheinander mehr oder minder große Agglomerate von der Vibrationsrinne in das Prüfgefäß. Aus diesen Gründen wird bei den Materialmischungen der Prüfzylinder zur Bestimmung der Volumenstabilität auf dem Kleinprüfstand vorsichtig von Hand mit der Laborschaukel befüllt, bis die Einstreuhöhe von 250 mm erreicht ist.

Die Messungen sollen in Anlehnung an ISO/Cd 18393 mit einer Ausgleichsfeuchte bei 23/50 durchgeführt werden, weshalb die Proben in diesem Klima bis zur Massekonstanz (Masseabweichung zwischen zwei Messungen im Abstand von 6 h < 0,1 %) klimatisiert werden.

Bevor mit den eigentlichen Messungen begonnen wird, muss für jedes Material ein Kalibrierungslauf durchgeführt werden, bei dem durch sukzessives Befüllen des Ausgleichsfachs die Schwingungsgrößen 1,5 mm Amplitude und 8 g Beschleunigung eingestellt werden. Hieraus ergibt sich entsprechend Gleichung [1] und [2] eine Frequenz von 51,5 Hz. Abweichungen in der Frequenz von  $\pm 0,5$  Hz sollen akzeptiert werden, womit sich für die Amplitude ein Sollbereich von  $\pm 0,02$  mm ergibt. Die Messungen hierzu erfolgen erst ab einer Maschinenlaufzeit von fünf Minuten, da in dieser Zeit bereits ein Großteil der Setzung erfolgt ist, die dynamische Masse sich im weiteren Versuchsverlauf also nicht mehr wesentlich ändert. Wenn die nötige Ausgleichsmasse ermittelt ist, folgen die eigentlichen Setzungsversuche.

Der Zylinder wird nun von Hand mit einer kleinen Laborschaukel befüllt, wobei auf ein gleichmäßiges Einstreuen zu achten ist. Um eine homogene Materialverteilung über die Zylinderhöhe zu erreichen, wird die klimatisierte Probe gekegelt und geviertelt und die entstehenden Teile nacheinander über Kreuz eingestreut. Da die Streudichte bei der Einschüttung von Hand erfahrungsgemäß meist etwas niedriger ausfällt als der mit der Vibrationsrinne ermittelte Wert, wird das Material nach dem

Einstreuen mit einem Druckstempel auf 250 mm vorverdichtet, um als Startdichte die gewünschte Streudichte einzustellen.

Der fertig befüllte Prüfzylinder wird anschließend gewogen, um die tatsächlich vorliegende Feuchtmasse festzustellen. Die Probenmassen werden zwischen den einzelnen Versuchen leicht schwanken, da die Materialien aus praktischen Gründen ja vor der eigentlichen Klimatisierung abgewogen werden, was in dieser Größenordnung auf die Belastungsintensität aber keinen Einfluss mehr nimmt.

In den Quadranten des Zylinders befinden sich Messskalen, an denen die Einstreuhöhe abgelesen werden kann, womit sich bei bekannter Feuchtmasse die Dichten bestimmen lassen. Nach der Vorverdichtung durch das Auflagergewicht werden wieder die Höhen gemessen. Anschließend wird das Material bei aufgelegtem Auflagergewicht 30 min lang mit Schwingungen belastet und die Setzungshöhe gemessen. Um zu erkennen, ob die maximale Setzung erreicht ist, wird noch einmal weitere fünf Minuten gerüttelt und überprüft, ob eine weitere Setzung auftritt. Dieser Wert wird anschließend in die unter den gewählten Versuchsparametern als volumenstabil ermittelte Dichte umgerechnet. Um ein Maß für das Rückstellvermögen zu erhalten, wird schließlich das Auflagergewicht entfernt, weitere fünf Minuten gerüttelt und die Höhe gemessen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis kein weiteres Rückstellen mehr zu beobachten ist. Die Rückstelldichte im Vergleich zur volumenstabilen Setzungsdichte soll Aufschluss über das Relaxationsvermögen des beanspruchten Materials geben.

Aus den gemessenen Höhen wird, wie beschrieben, jeweils die Dichte des Materials errechnet. Um diese auf  $\rho_{\text{atro}}$  Spanmasse zu beziehen, schließt jeder Versuch mit einer Feuchtebestimmung nach der Darrmethode ab.

#### 4.2.2.2 Untersuchungen zum Kompressionsverhalten

Das Kompressionsverhalten der Materialien soll über eine kontinuierliche Messung von Kraft und Weg während der Verdichtung einer Materialsäule, ausgehend von der Streudichte, untersucht werden. Die messtechnische Realisierung mit einer Universalprüfmaschine der Fa. TEST, Typ 112, und der Messdatenerfassung durch das Messdatenerfassungs-programm DIADEM der Fa. National Instruments wurde während der Arbeit von SCHUNK 2009 umgesetzt (Abbildung 4-39). Der dort beschriebene Ablauf wird übernommen.

Repräsentative Materialproben werden im Klima 23/50 bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert. Ein Plexiglaszylinder der Höhe 250 mm und einem Durchmesser von 190 mm wird mit der Laborschaukel von Hand homogen mit dem Material befüllt. Die Einbringdichte stellt damit die Streudichte des Materials unter den gegebenen Einstreubedingungen dar und ist deshalb nicht exakt mit der nach 4.2.1.4 ermittelten Streudichte identisch. Nachdem der Zylinder befüllt wurde, wird die Anordnung in die Universalprüfmaschine eingebaut und der Verdichtungsprozess gestartet. Hierbei fährt der Zylinder mit einer konstanten Geschwindigkeit von 150 mm/min von unten gegen einen Pressstempel, der über einen Metallstab mit der Kraftmessdose verbunden ist, und verdichtet die Materialsäule um 200 mm auf 1/5 ihrer ursprünglichen Höhe. Die aufgenommenen Daten Maschinenweg [mm] und Kraft [N] stehen nach der Prüfung zur Auswertung zur Verfügung.

Um dem Maschinenweg, ausgehend von der Starthöhe, die Materialdichte bezogen auf  $\rho_{\text{atro}}$  zuzuordnen zu können, wird nach dem Versuch die Materialmasse ermittelt und eine Feuchtebestimmung nach der Darrmethode (4.2.1.2) durchgeführt. Der gemessene Maschinenweg kann so auf die Materialdichte in  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  umgerechnet werden. Der Zusammenhang Kraft [N] aufgetragen über der Dichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] geht schließlich, zusammengefasst über die fünf Einzelversuche, in eine Regressionsrechnung ein und wird als Polynom 2. Grades dargestellt. Um Materialien

unterschiedlicher Schüttdichte zu vergleichen, kann die Abszisse auch auf die Streudichte bezogen werden, wodurch ein Bezug auf einen dimensionslosen Verdichtungsfaktor = Dichte / Streudichte entsteht. Der theoretisch kleinste Verdichtungsfaktor ist 1 (Dichte = Streudichte). Praktisch können aber auch Verdichtungsfaktoren  $< 1$  entstehen, da die Schüttdichte innerhalb einer Versuchsreihe schwankt.

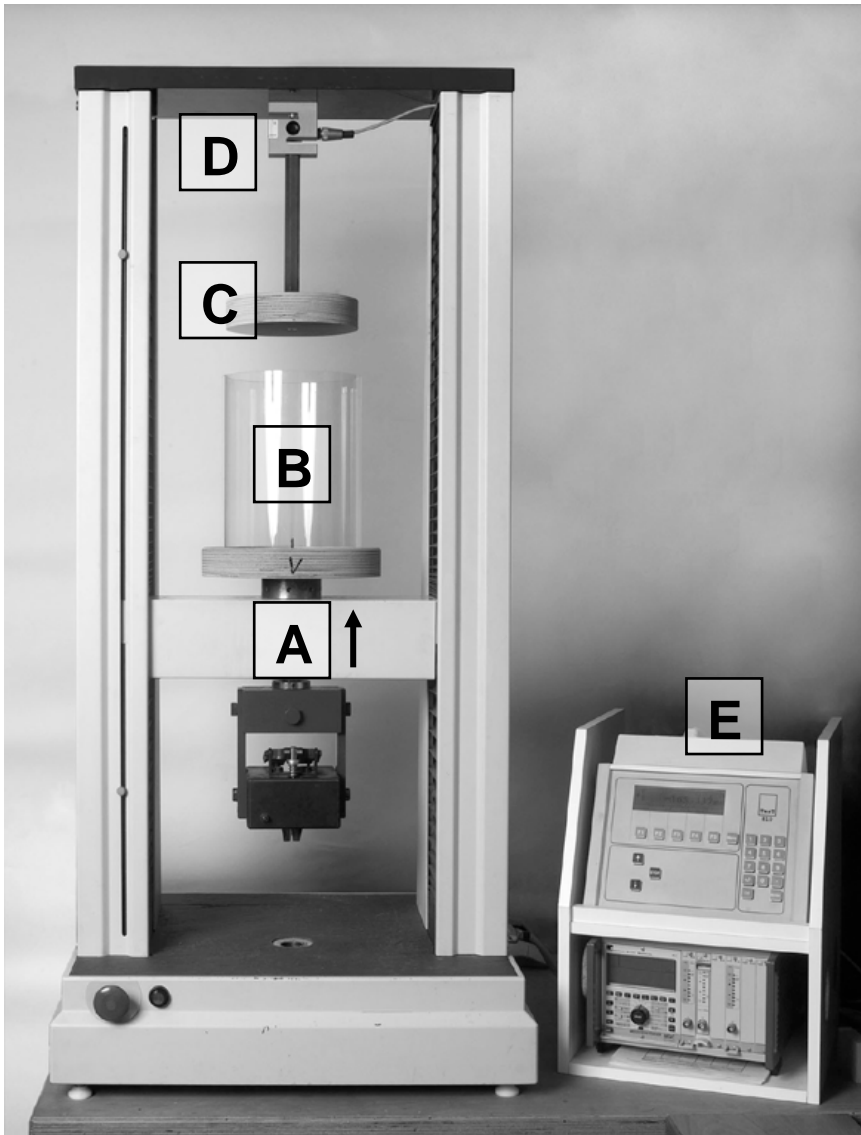


Abbildung 4-39 Realisierte Messanordnung zur Untersuchung des Kompressionsverhaltens; A: verfahrbare Traverse, B: Probenhalter; C: Pressstempel, D: Kraftmessdose, E: Messverstärker

#### 4.2.2.3 Prüfung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393

Der in 4.2.2.1 beschriebene Prüfablauf ermöglicht vergleichende Aussagen zum Setzungsverhalten unterschiedlicher loser Materialien nach einer definierten sinusförmigen Schwingungsbelastung. Neben den reinen Materialspezifika hat jedoch auch die Ausführung des Prüfbehältnisses entscheidenden Einfluss auf die Volumenstabilität des eingebrachten Materials. In 3.1.2 werden in früheren Projekten angewendete Prüfkonzepte vorgestellt, die mit dem Material befüllte Wandgefache realistischer Maße und Ausführung mit Schwingungen und impulsartigen Belastungen beaufschlagen, um so Aussagen über das Setzungsverhalten der eingebrachten losen Dämmstoffe unter möglichst realen Einbaubedingungen treffen zu können. Die beschriebenen Schwierigkeiten, eine ausreichend steife Gefachkonstruktion zu erreichen, um die auftretenden Kräfte und Beschleunigungen an der

Prüfeinrichtung zu kontrollieren, führten zu der Entwicklung einer Prüfmethode, die sich an dem Normvorschlag der in ISO/CD 18393 beschriebenen Methode C orientiert und im Rahmen der Arbeit von SCHUNK 2009 umgesetzt und erprobt wurde.

Um die benötigten Materialmengen überschaubar zu halten, wurde eine Einrichtung entworfen, die sich an den in der ISO/CD 18393 vorgeschlagenen Mindestmaßen orientiert (Breite: 625, Höhe: 1000, Tiefe: 160 / (240) / (300) [mm]). Hierzu wurden drei Fichtenholzrahmen (Materialstärke 40 mm) unterschiedlicher lichter Tiefe konstruiert, die als Träger für verschiedene Beplankungsmaterialien fungieren. Zur Befüllung kann jeweils eine Seite der Beplankung demontiert, das Gefach auf die Seite gelegt und das Material eingestreut werden. Um bei höheren Einbringdichten eine gleichmäßige Verdichtung zu erzielen und Lagenbildungen zu vermeiden, kann auf das Gefach ein Einstreurahmen aufgesetzt werden. Das Material wird dann überhöht eingebracht und anschließend über einen Pressstempel so verdichtet, dass die Konstruktion mit der Deckelbeplankung verschlossen werden kann. Die gesamte Konstruktion ist über eine Grundplatte aus 48 mm dickem Buchensperrholz mit einem Rüttelrost verschraubt.

Der Rüttelrost stammt aus dem Projekt von VOGEL 1999. Um die resonanzanfällige zweidimensionale Schwingung des ursprünglich montierten Kreisrüttlers zu vereinfachen, wurden zwei Kreisrüttler gegenläufig zueinander montiert. Auf diese Weise heben sich die umlaufenden Kraftvektoren in horizontaler Richtung auf, während sie sich in vertikaler Richtung addieren. Das System schwingt nun mit einer einachsigen vertikalen Sinusschwingung. Das Prinzip der Krafteinleitung ist in Abbildung 4-40 dargestellt.

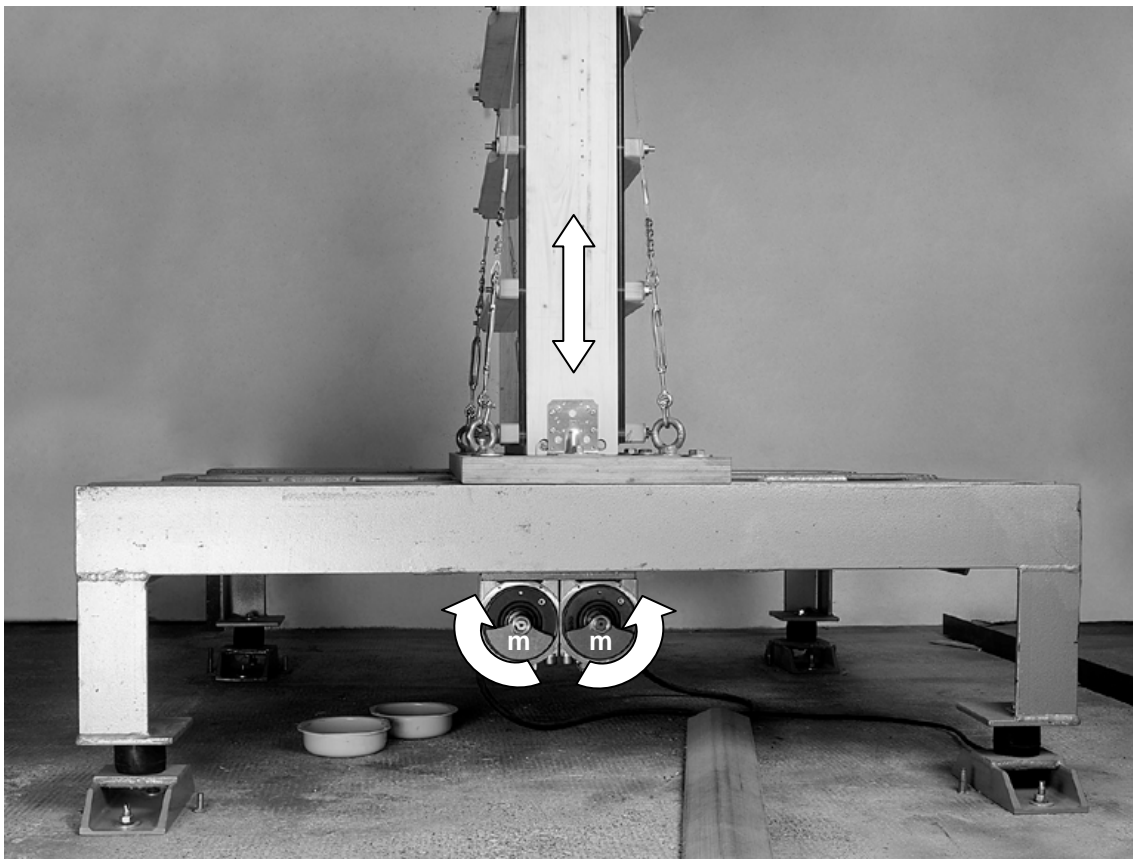


Abbildung 4-40 Prinzip der Krafteinleitung am Rütteltisch mit aufgespanntem Gefach

Zur Entkoppelung der schwingenden Konstruktion vom steifen Betonboden wurden früher Federbeine verwendet. Eine Umstellung auf Elastomerlager (Schwingmetallpuffer 70x60 A, 55 Shore) führt zu einem deutlich ruhigeren Lauf des Systems.

Um die am System wirkenden Beschleunigungskräfte messen zu können, wurde bereits bei den Testläufen zur Optimierung der Konstruktion auf der Grundplatte ein Beschleunigungsaufnehmer der Fa. Kistler, Typ 8610B100, montiert, mit dem Beschleunigungen im Bereich von 0 – 100 g erfasst werden können. Die Abtastung des Messwertgebers und die anschließende Auswertung erfolgt mit dem Messdatenerfassungsprogramm DIADEM der Fa. National Instruments. Eine Fast-Fourier-Transformation des Zeitsignals ermöglicht eine Frequenzanalyse der erzielten Beschleunigungen. Die daraus abgeleitete Darstellung als Wasserfalldiagramm bildet die hintereinandergereihten Frequenzanalysen während der Versuchslaufzeit aufgenommenener Messungen ab und gibt so einen guten Überblick über die Schwingungscharakteristik des betrachteten Systems.

Abbildung 4-41 zeigt die Schwingungscharakteristik des Rütteltisches während eines Testlaufs in der Konstruktionsphase mit dem montierten Gefach bei Anregung von 1 Hz bis 80 Hz (Anregungsfrequenz) und die gemessene Schwingfrequenz mit den zugehörigen Beschleunigungsamplituden. Anfangs folgen die gemessenen Schwingfrequenzen der Frequenz der anregenden Kreisrüttler verhältnismäßig gut. Im Bereich zwischen 65 Hz und 80 Hz der Anregungsfrequenz zeigen sich aber deutliche Überlagerungen, die aus Resonanzen in der Konstruktion resultieren, die bei ca. 200 Hz liegen (Pfeil).

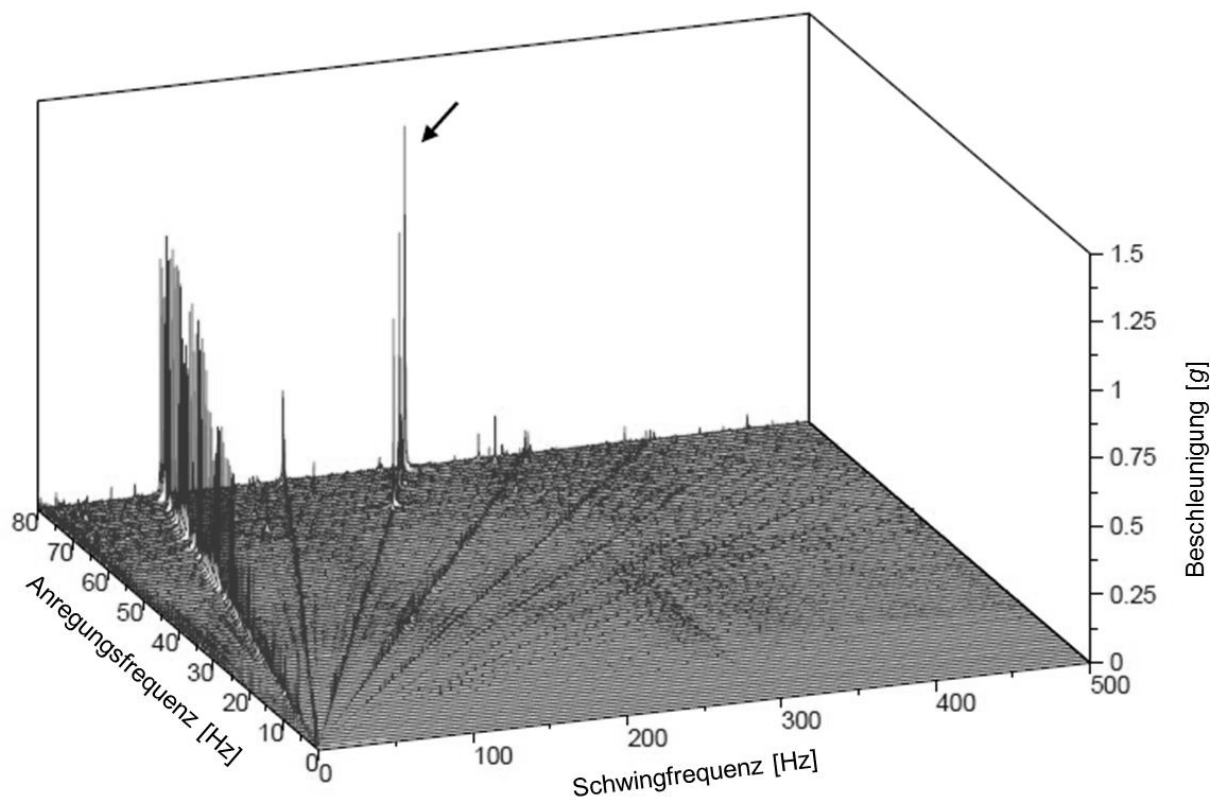


Abbildung 4-41 Schwingungscharakteristik mit ausgeprägten Überlagerungen im Bereich zwischen 65 Hz und 80 Hz

Optimierungen der Konstruktion konnten so durch eine konsequente Auswertung der Schwingungsdaten rückgekoppelt werden, wobei folgende Problemfelder identifiziert wurden.

Die ursprüngliche Einspannung des Gefachs mit Gewindestangen zwischen einer Deckelplatte und der Grundplatte zeigte sich resonanzanfällig. Es traten starke Schwingungen der verhältnismäßig massiven Gewindestangen auf. Zudem war die Konstruktion wenig bedienerfreundlich. Als steifere und überdies leichtere Konstruktion wurde schließlich eine Abspannung des Gefachs auf die Grundplatte über Drahtseile und Wantenspanner umgesetzt. Große Resonanzen traten anfangs

überdies auch durch die Schwingung der ursprünglich nur an den Seiten des Rüttelrostes verschraubten Grundplatte auf, was über dem Zeitsignal teilweise zu Beschleunigungen  $> 100 g$  führte. Durch eine zusätzliche Fixierung der Grundplatte auf der Mittelstrebe des Rüttelrostes konnte dieses Resonanzphänomen beseitigt werden. Abbildung 4-42 zeigt die Schwingungscharakteristik der optimierten Konstruktion. Die noch vorhandenen Überlagerungen sind vernachlässigbar.

Um die in der ISO/CD 18393 geforderte Beschleunigung von mindestens  $15 \text{ m/s}^2$  (Annahme: Beschleunigung über dem frequenzanalysierten Signal) zu erreichen, wurde in Absprache mit dem Hersteller der Kreisrüttler die Unwuchtmasse der beiden Motoren erhöht. Damit dadurch die zulässige Maximalkraft der Motoren nicht überschritten wird, darf mit der montierten Unwuchtmasse nur noch eine Maximalfrequenz von 73 Hz angefahren werden. Beide Kreisrüttler zusammen liefern in der vorliegenden Konfiguration von Masse und Stellung der Unwuchtscheiben auf der Welle bei dieser Frequenz einen umlaufenden Kraftvektor mit ca. 17,7 kN. Wie in Abbildung 4-42 zu sehen, werden damit die geforderten  $1,5 g$  Beschleunigung (ca.  $15 \text{ m/s}^2$ ) knapp erreicht.

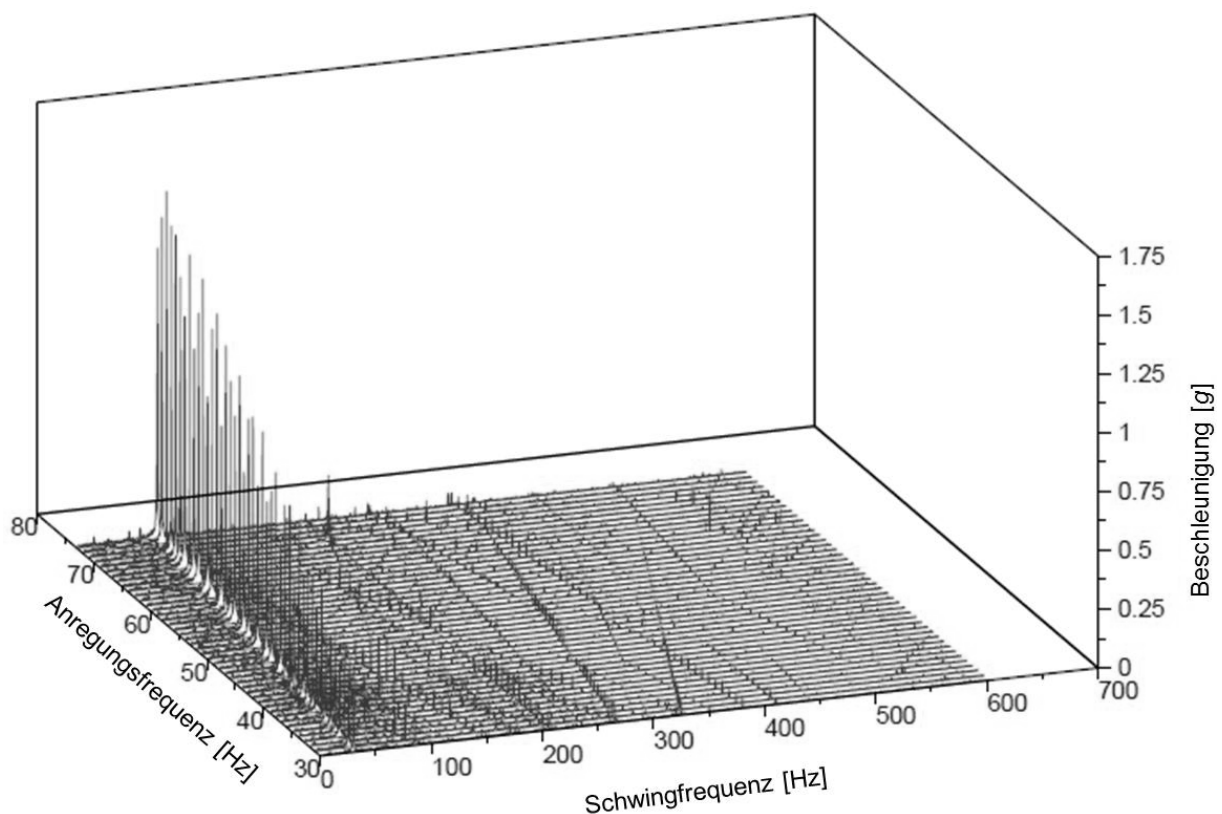


Abbildung 4-42 Schwingungscharakteristik mit geringen Überlagerungen im Bereich von 70 Hz

Neben der Schwingungsanregung soll das Gefach auch einer impulsartigen Belastung durch Kraftstöße auf den Gefachboden ausgesetzt werden können. Hierzu wird das Gefach in Anlehnung an ISO/CD 18393 Methode B um die dort verlangte Mindesthöhe von 5 cm angehoben und anschließend geführt fallen gelassen, um mit dem Gefachboden auf dem Betonboden aufzustoßen. Um eine vertikale, kontrollierte Fallstrecke sicherzustellen, werden an die Fichtenholzrahmen seitliche Metallwinkel angeschraubt, die in einem über ein Gestell mit der Wand verbundenem Rollensystem geführt werden (Abbildung 4-43). Um die Grundplatte der Gefachkonstruktion zu schonen, werden unter die Grundplatte zwei Kanthölzer aus Esche montiert, die gleichzeitig die Justierung der Konstruktion bezüglich des Aufpralls auf den nicht exakt planen Betonboden erleichtern. Das Gefach wird über Drahtseile mit einer speziell konstruierten Auslösevorrichtung verbunden, die an einer Krankonstruktion befestigt ist. In dieser Anordnung wird das Gefach auf die gewünschte Fallhöhe

angehoben. Anschließend wird die Auslösevorrichtung betätigt und das Gefach fällt geführt zu Boden, bis es auf dem starren Betonboden aufschlägt.

Um auch hier die auftretenden Kräfte messen zu können, wird in der Mitte der Grundplatte auf der gleichen Position wie bei den Schwingungsmessungen ein Beschleunigungsaufnehmer der Fa. Kistler, Typ 8642A5, mit einem Messbereich von  $\pm 5000 \text{ g}$  montiert. Über eine Messverstärkung mit dem Faktor 10 können schließlich Beschleunigungen bis  $500 \text{ g}$  erfasst werden. Abbildung 4-43 zeigt die für den Fallversuch aufgebaute Konstruktion.

Die Höhe des Materials im Gefach soll möglichst objektiv erfasst werden. Außerdem soll bei der Verwendung von opaken Beplankungsmaterialien (OSB, PB) auf Sichtfenster verzichtet werden. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurde ein Laser-Entfernungsmesser (Genauigkeit:  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ) in eine speziell konstruierte Haltevorrichtung eingebaut. Durch einen Schlitz im oberen Fries des Fichtenholzrahmens kann so in beliebig vielen Mess-feldern über der Gefachbreite der Abstand zwischen der Hinterkante des Laser-Entfernungsmessers und der Oberfläche der Materialsäule gemessen werden.

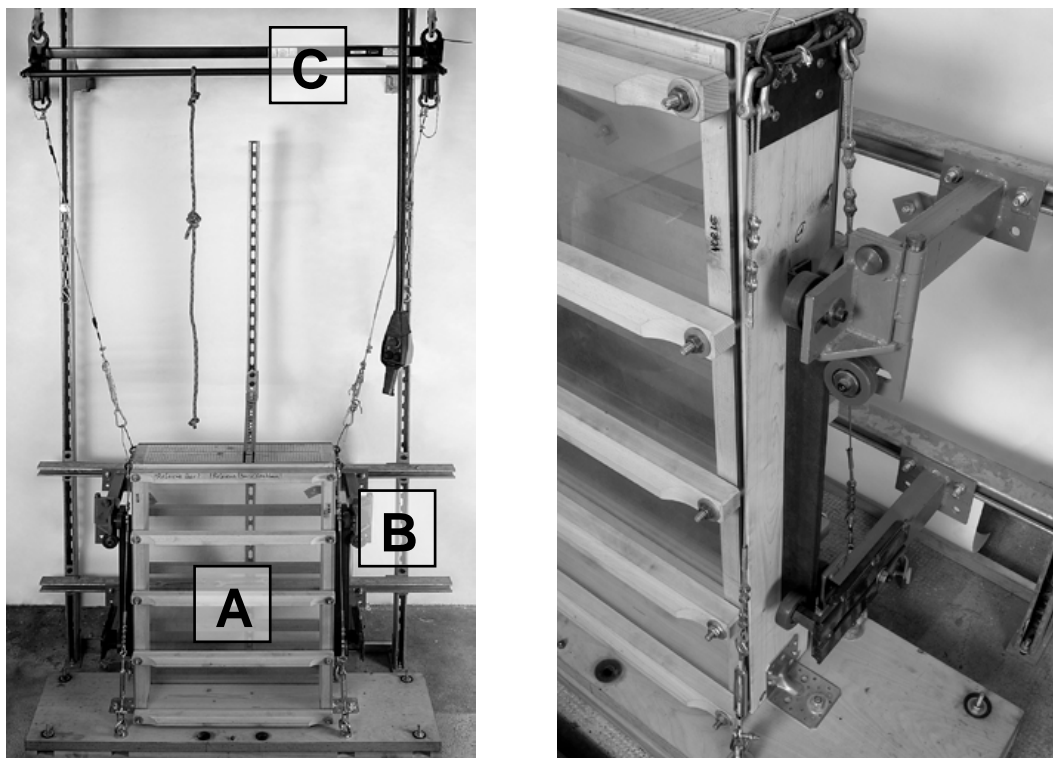


Abbildung 4-43 Links: Prüfaufbau zur Durchführung der Fallversuche mit eingespanntem Gefach (A), Führungsschienen (B) und Auslösevorrichtung (C); Rechts: Detail zur Führung durch Metallwinkel und Rollenkonstruktion

Um einen Kompromiss zwischen der möglichst exakten Erfassung der Materialhöhen und einem vertretbaren Messaufwand zu finden, wurde die Breite von  $625 \text{ mm}$  in  $60$  Messfelder mit einer Breite von  $10 \text{ mm}$  aufgeteilt, wobei das  $1.$  und  $60.$  Messfeld  $12,5 \text{ mm}$  von der Gefachwand entfernt beginnen bzw. enden. Die Höhenmessung erfolgt immer in der Mitte eines jeden Messfeldes.

Unter Berücksichtigung der in den Vorversuchen ermittelten Belastungen und in Anlehnung an die Vorgaben in der ISO/CD 18393 wurde schließlich folgender Versuchsablauf durchgeführt.

Auf eine Klimatisierung des Materials wird bewusst verzichtet. Während des Transportes von der Klimakammer in den Versuchsraum und vor allem während der Einbringung in das Gefach würden

sich je nach Klima und Zeitdauer der Einbringung uneinheitliche Trocknungs-/Auffeuchtungsprozesse einstellen. Je nachdem, wann und in welchen Schichten nach Versuchsende dann die Materialfeuchtebestimmung zur Ermittlung der Einbringdichte bezogen auf atro Spanmasse durchgeführt wird, könnten die ermittelten Setzungsdichten fehlerbehaftet sein. Zudem ist das Klima in dem im Keller gelegenen Versuchsraum relativ konstant. Die Raumklimadaten wurden über die Versuchsdauer mit einem Thermohygrographen aufgezeichnet.

Die Feuchte des im Raumklima in Drahtkörben bis zur Massekonstanz gelagerten Materials wird mittels Darmmethode (4.2.1.2) bestimmt. Aus dem Volumen des Gefachs und der gewünschten Einbringdichte wird die nötige Materialmasse bestimmt. Das repräsentativ aufbereitete Material wird mit einer Handschaufel in das liegende und einseitig geöffnete Gefach überhöht eingestreut und mit dem Pressstempel verdichtet. Anschließend wird die Deckelbeplankung angebracht und die Konstruktion kann auf dem Rüttelrost oder in die Fallvorrichtung montiert werden. Der weitere Versuchsablauf ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 4-9 Versuchsablauf zur Prüfung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393

Versuchsschritt	Beschreibung
1	Referenzhöhenmessung leer, 60 Messfelder
2	Befüllen des Gefachs und Montage auf Rüttelrost
3	Höhenmessung, 60 Messfelder
4	Schwingung, 30 min konstant bei 73 Hz
5	Höhenmessung, 60 Messfelder
6	Schwingung, Rampe: 30 - 73 Hz (1 Hz Schritte je 30 s)
7	Höhenmessung, 60 Messfelder
8	Umbau auf Fallprüfstand
9	Höhenmessung, 60 Messfelder
10	5 Fallversuche, jeweils 13 Messfelder nach jedem Aufschlag
11	Höhenmessung, 60 Messfelder
12	5 Fallversuche jeweils 13 Messfelder nach jedem Aufschlag
13	Höhenmessung, 60 Messfelder
16	Umbau auf Rüttelrost
17	Höhenmessung, 60 Messfelder
18	Schwingung, Rampe: 30 - 73 Hz (1 Hz Schritte je 30 s)
19	Höhenmessung, 60 Messfelder

Nach dem letzten Versuchsschritt wird das befüllte Gefach mit einer Schwerlastwaage auf 0,005 kg genau gewogen. Anschließend wird das Gefach auf die Seite gelegt, die Beplankung wird entfernt und die Resthöhe der Materialsäule wird über der Höhe gedrittelt und mittels Reißzwecken und Bindfaden abgesteckt. Die einzelnen Drittel werden mit der Laborschaukel vorsichtig abgenommen und einzeln mit einer Analysenwaage auf 0,1 g genau ausgewogen. Aus den Massen und den zugehörigen Volumina (bezogen auf die gedrittelte Setzungshöhe der letzten Höhenmessung) kann so ein Dichteprofil über der Materialhöhe berechnet werden.

Anschließend wird die Masse des leeren Gefachs auf der Schwerlastwaage gewogen. Aus der Massendifferenz zwischen vollem und leerem Gefach wird die Feuchtmasse des Materials berechnet. Gleichzeitig dient der Wert zur Kontrolle der fehlerbehafteteren Wiegung der Massen der einzelnen Drittel. Der Versuchsdurchgang schließt mit einer Feuchtebestimmung nach der Darmmethode (4.2.1.2) ab, für die jeweils eine Materialprobe aus jedem Drittel über der Höhe genommen wird.



Die Beschleunigungen bei den Schwingungsbelastungen werden mit dem beschriebenen 100 g-Beschleunigungsaufnehmer aufgenommen, über einen Messverstärker 10-fach verstärkt und mit dem Messdatenerfassungsprogramm DIADEM aufgezeichnet und ausgewertet. Während der konstanten Vibration (Tabelle 4-9, Versuchsschritt 4) wird 30 s nach Versuchsstart und alle weiteren 30 s während der Versuchslaufzeit mit einer Abtastfrequenz von 1205 Hz ein Speicher mit 4096 Werten gefüllt. Bei den Rampen (Tabelle 4-9, Versuchsschritte 6 und 18) erhöht die SPS-Steuerung, ausgehend von 30 Hz bis 73 Hz, alle 30 s die Frequenz um 1 Hz. Hier erfolgt die erste Beschleunigungsmessung 15 s nach Versuchsstart; alle weiteren Messungen folgen im Abstand von 30 s. Abtastfrequenz und Speicher sind entsprechend den Einstellungen bei der konstanten Vibration gewählt.

Die Fallversuche werden mit dem beschriebenen 5000 g-Beschleunigungsaufnehmer aufgenommen, über einen Messverstärker 10-fach verstärkt und ebenfalls mit dem Messdatenerfassungsprogramm DIADEM aufgezeichnet und ausgewertet. Da der eingeleitete Kraftstoß beim Auftreffen auf dem Boden verhältnismäßig schnell erfolgt und ein scharfer Belastungsspeak zu erwarten ist, wird die Abtastfrequenz hier mit 50000 Hz deutlich höher gewählt, um die tatsächliche Belastungsspitze korrekt erfassen zu können. Um den benötigten Speicher überschaubar zu halten, wird der Start der Messung über einen programmierten Trigger ausgelöst, der auf die Fallbeschleunigung nach der Betätigung der Auslösevorrichtung reagiert und anschließend einen Speicher mit 50000 Werten füllt.

Das Prüffeld aus Rütteltisch, Fallvorrichtung und Messtechnik ist in Abbildung 4-44 schematisch dargestellt.

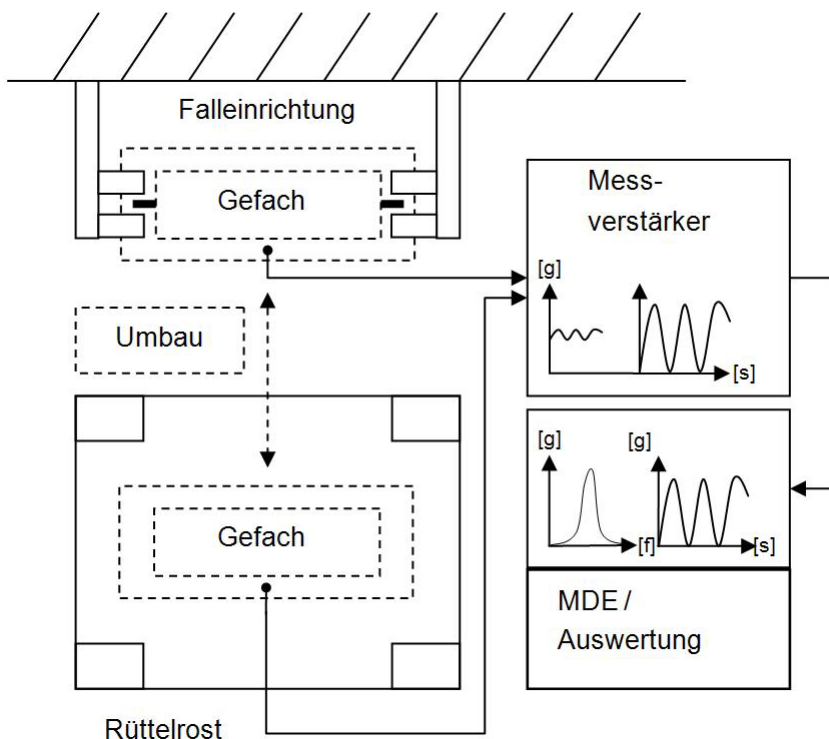


Abbildung 4-44 Prüffeld zur Ermittlung der Volumenstabilität in einem Prüfgefach nach ISO/CD 18393

#### 4.2.2.4 Ermittlung der Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen im Material

Die Setzung loser Materialien basiert auf unterschiedlichen Phänomenen. Neben einer Umlagerung der Partikel zur kleinstmöglichen Packung können auch Separationen, Stauchungen, Knicke, Materialbruch, etc. zur Setzung beitragen. Zumeist werden in einem zufallsgemischtem polydispersen

System mehrere Faktoren parallel zusammenwirken und in ihrer Summe die Setzung des Gesamtsystems bestimmen, die sich schließlich über eine Verringerung des Volumens bei gleicher Masse messen und als Dichteerhöhung darstellen lässt.

Eine Beobachtung der Bewegung der losen Partikel im Zuge einer vibrations- oder impulsartigen Belastung ist durch entsprechende Sichtfenster möglich – eine Bewertung der beobachtbaren Vorgänge (z. B. Separation von Feinanteil, Zittern großer oder kleiner Späne, Verschiebungen, etc.) ist jedoch schwierig. Zum einen gelten die möglichen Feststellungen nur für die beobachtbare Ebene, also die Grenzschicht zur volumenbegrenzenden Außenhülle. Von den hier vorliegenden Wechselwirkungen zwischen Gefachwand und Materialschicht auf die Vorgänge in der Materialsäule zu schließen, verbietet sich aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen, was auch die Frage nach dem Einfluss des Materials der Gefachwand, insbesondere der Rauigkeit, auf die Übertragung der Bewegung des Gefachs auf die Materialschicht aufwirft. Zum anderen ist eine quantitative Einordnung der beobachteten Partikelbewegungen unmöglich, solange die Rückkopplung zu den unmittelbar zusammenhängenden Setzungserscheinungen fehlt, da diese nur integrativ für die wieder zeitveränderlich auftretende Intensität der Summe der beobachteten Partikelbewegung, bezüglich Phänomen und Intensität, gemessen werden können.

Um in der Mischung mit dem Kompositpartner den Einfluss des FES auf das Verhalten der Materialmischung unter Belastung abzubilden, soll die Übertragung der am Prüfgefäß wirksamen Beschleunigung in das Material hinein gemessen werden. Hierzu werden mit geeigneten Beschleunigungsaufnehmern zeitgleich die Beschleunigungen am Gefach und in der Materialschicht gemessen und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Theoretisch sind drei Zustände denkbar. Eine ideale Dämpfung liegt vor, wenn bei einer bestimmten Beschleunigung des Prüfgefäßes ( $a_{\text{außen}}$ ) die gemessene Beschleunigung im Material ( $a_{\text{innen}}$ ) gegen Null geht. Eine ideale Übertragung hingegen würde bedeuten, dass das Verhältnis  $a_{\text{innen}} / a_{\text{außen}}$  gegen 1 läuft. Das Verhältnis  $a_{\text{innen}} / a_{\text{außen}}$  wird im Weiteren als Übertragungsverhältnis (ÜV) bezeichnet.

(ideale Dämpfung)  $0 \leq \text{ÜV} \leq 1$  (ideale Übertragung)

Als dritter möglicher Zustand sind auch Resonanzphänomene denkbar, in denen die Beschleunigung  $a_{\text{innen}} > a_{\text{außen}}$  ist. Das ÜV ist dann also  $> 1$ .

Um eine reproduzierbare Schwingungsbelastung zu generieren, die möglichst frei von Resonanzen des Gefachaufbaus bleibt, wird als Probenhalter auf einen Plexiglasprüfzylinder (Durchmesser: 191 mm; Höhe: 395 mm) zurückgegriffen und die Erzeugung von sinusförmigen Schwingungen mit der AS 200 control (4.2.2.1) realisiert. Die Messung der am Prüfzylinder wirksamen Schwingung erfolgt auf der Grundplatte der AS 200 control mit einem Beschleunigungsaufnehmer, Typ 8610B100, mit einem Messbereich von  $\pm 100 \text{ g}$ .

Die Messung der im Material wirksamen Schwingung erfolgt mit einem Beschleunigungsaufnehmer der Fa. Kistler, Typ 8628A5, mit einem Messbereich von  $\pm 5 \text{ g}$ . Da die zu messende Schwingung des umgebenden porösen Mediums sich auf die punktförmige Masse des Beschleunigungsaufnehmers schlecht übertragen würde und, um eine senkrechte Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers in der Messebene zu garantieren, ist der 5 g-Beschleunigungsaufnehmer auf einem Alu-Lochblech der Abmessungen 9,5 cm x 11 cm montiert. Die Anordnung aus Alu-Lochblech und Beschleunigungsaufnehmer wiegt 25 g. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass mit dem Messkabel eine Entlastungsschleife gelegt wird, um ein freies Mitschwingen des Alublechs mit den Bewegungen des Materials zu gewährleisten. Die Einrichtung ist als Prinzipskizze in Abbildung 4-45 dargestellt.

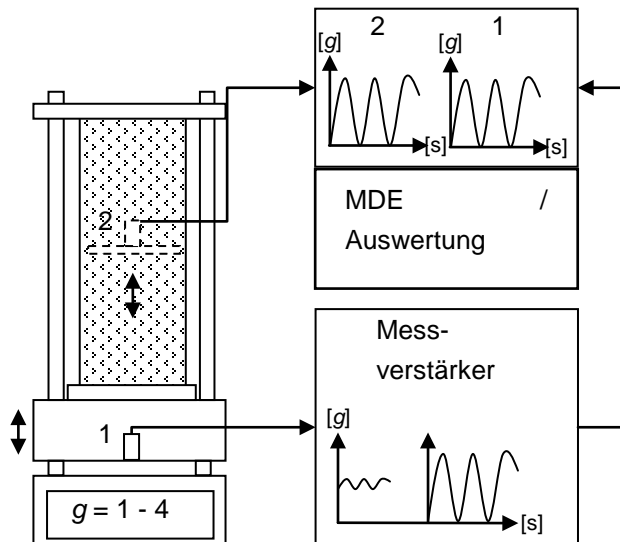


Abbildung 4-45 Prinzipskizze des Messaufbaus zur Ermittlung der Übertragung von Schwingungen in die Materialschicht

Das Messkabel wird über ein Loch in der Spannvorrichtung nach außen geführt und mit der Messtechnik verbunden. Beide Beschleunigungsaufnehmer werden praktisch zeitgleich abgetastet. Das Signal des 100 g-Beschleunigungsaufnehmers wird mit einem Messverstärker 10-fach verstärkt. Beide Signale werden mit dem Messdatenerfassungsprogramm DIADEM erfasst und stehen anschließend zur Auswertung zur Verfügung.

Um zu überprüfen, ob die Beschleunigungsaufnehmer bei identischer Schwingung tatsächlich das gleiche Signal in die MDE einspeisen, wurden beide Beschleunigungsaufnehmer in einem Vorversuch nebeneinander auf der Grundplatte der unbelasteten AS 200 control starr montiert. In einem Testlauf wurde die Beschleunigung des schwingungsgebenden Systems in 10 Schritten zwischen 0,5 g und 5 g Beschleunigung erhöht, jede Stufe wurde fünfmal abgetastet und die Signale wurden, wie beschrieben, mit DIADEM ausgewertet. Die Mittelwerte der angefahrenen Belastungsniveaus beider Beschleunigungsaufnehmer wurden übereinander aufgetragen. Die zugehörige lineare Regression weicht von der Winkelhalbierenden  $f(x) = x$  ab. Setzt man den Wert des Beschleunigungsaufnehmers am Prüfzylinder als Bezugsbasis ein, so müssen also die Werte des Beschleunigungsaufnehmers im Material angepasst werden. Hierzu wurde die Abweichung der Mittelwerte jeder Kalibrierungsstufe auf den Wert des Beschleunigungsaufnehmers am Prüfzylinder bezogen und die so ermittelten prozentualen Abweichungen über den tatsächlich erzielten Beschleunigungen am Prüfzylinder aufgetragen und mit einem Regressionspolynom 6. Grades interpoliert. Aus dieser Funktion werden für den Wertebereich von 0–5 g anschließend die Korrekturwerte für die Messdaten des Beschleunigungsaufnehmers im Material errechnet. Ein zweiter Kalibrierungslauf in der gleichen Gerätekonfiguration wie zuvor zeigt mit den entsprechend korrigierten Werten eine gute Übereinstimmung mit der gewünschten Funktion  $f(x) = x$ .

Mischungen aus verschiedenen FES- und Altpapieranteilen, aber auch die Einzelmaterialien wurden bei unterschiedlichen Einbringdichten und Materialfeuchten auf die Übertragung der Schwingungen in das Materialgefüge hinein untersucht. Die Einbringmenge wurde nach einer Feuchtebestimmung mit der Schnelldarwaage (4.2.1.2) aus dem Volumen des Zylinders (Durchmesser: 191 mm; Höhe: 395 mm) und der gewünschten Einbringdichte ermittelt. Der Einbau des 5 g-Beschleunigungsaufnehmers in das Material erfolgte entweder in der Mitte der Materialsäule oder bei Versuchen mit sukzessiv steigender Einbringdichte auf 3/4 der Zylinderhöhe. Bei letzterem Vorgehen wird ausgehend von einer Startdichte im Bereich der Streudichte nach jedem Messdurchgang durch

Einstreuen von weiterem Material die Dichte bis etwa 200 % Streudichte erhöht. Die Einbringung von weiterem Material erfolgt dabei jeweils nach einer händischen Verdichtung der Materialsäule auf das Volumen der nächst höheren Einbringdichte, bezogen auf die Materialmasse der letzten Dichtestufe. Bei jeder Dichtestufe werden mit der AS 200 control Schwingungen mit einer Beschleunigung von 1 g – 4 g durchfahren. Auf eine Justage der dynamisch wirksamen Masse (vgl. 4.2.2.1) wird verzichtet. In jedem Versuchsschritt werden die Beschleunigungsaufnehmer im Abstand von 10 s mit einer Frequenz von 1024 Hz abgetastet, bis ein Speicher mit 4096 Werten gefüllt ist. Nach jeweils fünf Messungen wird an der AS 200 control die Beschleunigung um 0,5 g erhöht. Bei niedrigen Einbringdichten wird die Beschleunigung nur so weit erhöht, bis eine Setzung des Materials zu beobachten ist. Tritt eine Setzung auf, so wird der Versuchsschritt abgebrochen und die Einbringdichte wird durch die Zugabe von weiterem Material erhöht. Die Stufen, in denen die Einbringdichte erhöht wird, unterscheiden sich materialspezifisch und sind in der Ergebnisdarstellung angegeben. Nach Versuchsende wird die während der Versuchsdauer insgesamt applizierte Materialmasse ausgewogen und eine Feuchtebestimmung nach der Darrmethode (4.2.1.2) durchgeführt. Diese Werte dienen als Kontrolle der korrekten Einbringung der Einzelmassen zur Dichteerhöhung.

#### 4.2.2.5 Ermittlung der Mischgüte

Wie in Punkt 3.1.3 beschrieben, kann die Analyse der zur Bestimmung der Mischgüte gezogenen Proben bei polydispersen Systemen vereinfacht werden, indem man sich auf die Betrachtung zweier Komponenten beschränkt. Bei einer Mischung aus großflächigen Spanpartikeln (vgl. Abbildung 4-1) und einem beliebigen Kompositpartner bietet es sich an, den Anteil des FES als relevante Komponente A, alle anderen Partikel als Komponente B zu definieren, da für die Volumenstabilität vor allem eine möglichst gleichmäßige Verteilung der die Stützmatrix bildenden Spankomponente entscheidend ist. Einschränkend und vereinfachend bleibt zu definieren, dass alle anderen Partikel in erster Linie die Wärmeleitfähigkeit verbessern und als stabil sowie homogen verteilt angenommen werden, was für die untersuchten Kompositpartner weitgehend Gültigkeit besitzt.

Zur Bestimmung der Mischgüte nach der Mischerlaufzeit wird folgendes Vorgehen angewendet. Die Mischungspartner werden entsprechend den vorliegenden Massenverhältnissen auf abgewogen und die Mischertrommel wird befüllt. Die Probennahme erfolgt direkt nach der angegebenen Mischzeit mit Probenschaufeln, die vier Abteilungen mit 100 x 100 x 100 mm Seitenlänge (= 1 dm<sup>3</sup> Volumen) enthalten. Die Probenschaufeln werden definiert durch das gemischte Material geführt und auf diese Weise befüllt.

Je Probenschaufel können nun vier Proben mit 1,0 dm<sup>3</sup> Volumen entnommen werden. Die Proben werden anschließend auf einem Sieb abgesiebt, welches eine Maschenweite aufweist, die groß genug ist, um von den Partikeln des Kompositpartners mit einem Siebrückstand = null passiert zu werden. Die erhaltenen Massenanteile werden unter Berücksichtigung der Feuchte, ermittelt mit der Schnelldarrwaage, zueinander in Relation gesetzt.

Zur Untersuchung der Mischgüte in einer Probe (z. B. nach einer durchgeführten Prüfung) wird folgendes Vorgehen zur Probenziehung angewendet. Die Probe wird nach der Prüfung homogen durch Kegeln und Vierteln geteilt, bis ein Probenvolumen von ca. 1,0 dm<sup>3</sup> vorliegt, welches anschließend, wie vorher beschrieben mit einem Rundsieb in zwei Fraktionen getrennt wird.

Anteile des Mischungspartners A, welche kleiner sind als die gewählte Siebgröße, passieren die Maschen des Rundsiebes und bilden zusammen mit dem Mischungspartner B die Bodenfraktion. Über die aus den Siebanalysen bekannten Massenverhältnisse lassen sich die ermittelten Verhältnisse innerhalb der Probe aber trotzdem mit der Zusammensetzung der Grundgesamtheit

vergleichen. Der so zurückgerechnete Anteil FES  $c_K$  kann nun mit dem Sollwert der Grundgesamtheit  $c_{Gg}$  oder mit dem Mittelwert der gemessenen Konzentrationen einer Probencharge  $\bar{c}_K$  verglichen werden.

Außerdem wird die geschätzte empirische Streuung mit

$$s_K^2 = 1/(n - 1) * \text{Summe } (c_K - \bar{c}_K)^2 \quad [3]$$

berechnet.

#### 4.2.2.6 Untersuchungen zum Temperaturverhalten der Dämmschicht (Temperaturamplitudenverhältnis)

Der ermittelte Kennwert  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (4.2.1.5) beschreibt die Wärmeleitfähigkeit des Materials unter einem definierten Wärmegradienten und stationären Bedingungen. In der Praxis wird das Temperaturverhalten einer Dämmschicht aber, wie in 3.1.1 beschrieben, von instationären Wärmeströmen geprägt, die sich in Abhängigkeit der je nach Jahreszeit unterschiedlichen Tag-/Nachttemperaturzyklen unterscheiden. Neben der Wärmeleitfähigkeit ist in diesem Zusammenhang vor allem das Wärmespeichervermögen der Materialien von entscheidendem Einfluss.

Um das Temperaturverhalten der unterschiedlichen Materialien und Mischungen vergleichend beurteilen zu können, wird ein Differenztemperatur-Prüfstand aufgebaut. Dabei soll das zu prüfende Material auf der einen Seite einem zyklischen Temperaturwechsel, auf der anderen Seite einer konstanten Temperatur ausgesetzt werden. Auf beiden Seiten der Materialsäule sowie in sieben Messebenen im Material soll schließlich der Temperaturverlauf über der Zeit gemessen werden. Im Weiteren soll sichergestellt werden, dass die Messergebnisse der Temperaturfühler nicht durch Trocknungs- oder Aufwechungsprozesse während der Temperaturwechsel beeinflusst werden.

Der realisierte Prüfungsaufbau baut auf dem in SCHUNK 2009 entwickelten Prüfstand zur zerstörungsfreien Materialfeuchtemessung auf und besteht aus dem dort verwendeten Einsatz in einem SB11<sup>1500</sup> Klimaschrank der Fa. Weiss Technik und einem davor angebrachten Trockenschrank. Das zu prüfende Material ist in Kästen aus phenolharzgetränktem Sperrholz der Abmessungen  $B \times H \times T$  (axial zum Temperaturgradienten) = 400 x 300 x 480 [mm] eingebracht, welche in die entsprechenden Aussparungen des aus dem gleichen Material gefertigten SB11<sup>1500</sup> Einsatzes eingeschoben werden können. Die Kästen sind vorne und hinten mit einer Lochblechauflage belegt, wobei eine Seite als abnehmbarer Deckel ausgeführt ist, um die Kästen mit dem zu prüfenden Material befüllen zu können. Um vornehmlich während des Befüllens ein Herausrieseln des Feinanteils zu begrenzen, sind die Lochbleche zusätzlich mit Fliegengitterdraht belegt.

Die gewählte Anordnung soll die auftretenden Temperaturwechsel möglichst unverzögert in das Material einleiten, da in erster Linie materialspezifische Unterschiede zwischen den untersuchten Mischungen herausgearbeitet werden sollen. Deshalb wird auf die Simulation von praxisüblichen Wandaufbauten, beispielsweise Beplankungen, Dampfsperre, etc., bewusst verzichtet.

Um während der Prüfung eine gegenseitige Beeinflussung der Probekörper durch quer verlaufende Wärmeströme zu vermeiden, sind die Abteile zur Aufnahme der Kästen innerhalb des SB11-Einsatzes gegeneinander durch eine Isolierschicht getrennt. Die Anordnung ist in Abbildung 4-46 schematisch dargestellt.

Durch die Verwendung des Trockenschanks soll raumseitig eine konstante Temperatur eingestellt werden, die etwas über der während der Versuchsdurchführung im Sommer maximal zu erwartenden Raumtemperatur liegt. Dies erscheint sinnvoll, da sich die Prüfungen mit unterschiedlichen Materialien und variierenden Einbringdichten über mehrere Wochen mit teils deutlich unterschiedlichen

Raumtemperaturen hinziehen. Des Weiteren erhält man eine einheitliche Bezugstemperatur, die idealerweise auch frei von den ebenfalls unterschiedlichen Tag / Nachtschwankungen bleibt. Da an relativ warmen Tagen in dem Labor Raumtemperaturen bis zu 30°C auftreten können, wird die Temperatur in dem Trockenschrank auf 30°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) geregelt. Die Temperaturschwankung auf der Klimaschrankseite soll sich an einen realistischen Temperaturverlauf eines entsprechenden Sommerszenarios anlehnen, das sich um die gewählte Trockenschrankmitteltemperatur von 30°C herum bewegt. Hierzu wird aus den in VOGEL et al. 2002 aufgenommenen meteorologischen Daten für den Zeitraum 19.06. bis 21.06.2001 (VOGEL et al. 2002; ABB. 4.5.3.2-6) ein in sieben Schritten diskretisiertes Temperaturprofil erstellt ( $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ) und auf die gewählte Raumtemperatur von 30°C so verschoben, dass im Zeitraum von 24 h eine Schwankung zwischen 20°C und 40°C entsteht. Dieser Zyklus wird insgesamt dreimal durchfahren. Anschließend wird in dem Klimaschrank für 24 h eine konstante Temperatur von 30°C geregelt. Hierauf folgt eine steile Temperaturrampe, die innerhalb von 0,5 h von 30°C auf 10°C abfällt. Diese Temperatur wird wieder für 23,5 h gehalten. Nun folgt erneut eine Temperaturrampe von 10°C auf 30°C in 0,5 h und der Versuchszyklus schließt, indem die erreichten 30°C wieder für 23,5 h gehalten werden. Trockenschrankseitig werden konstant 30°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) eingestellt.

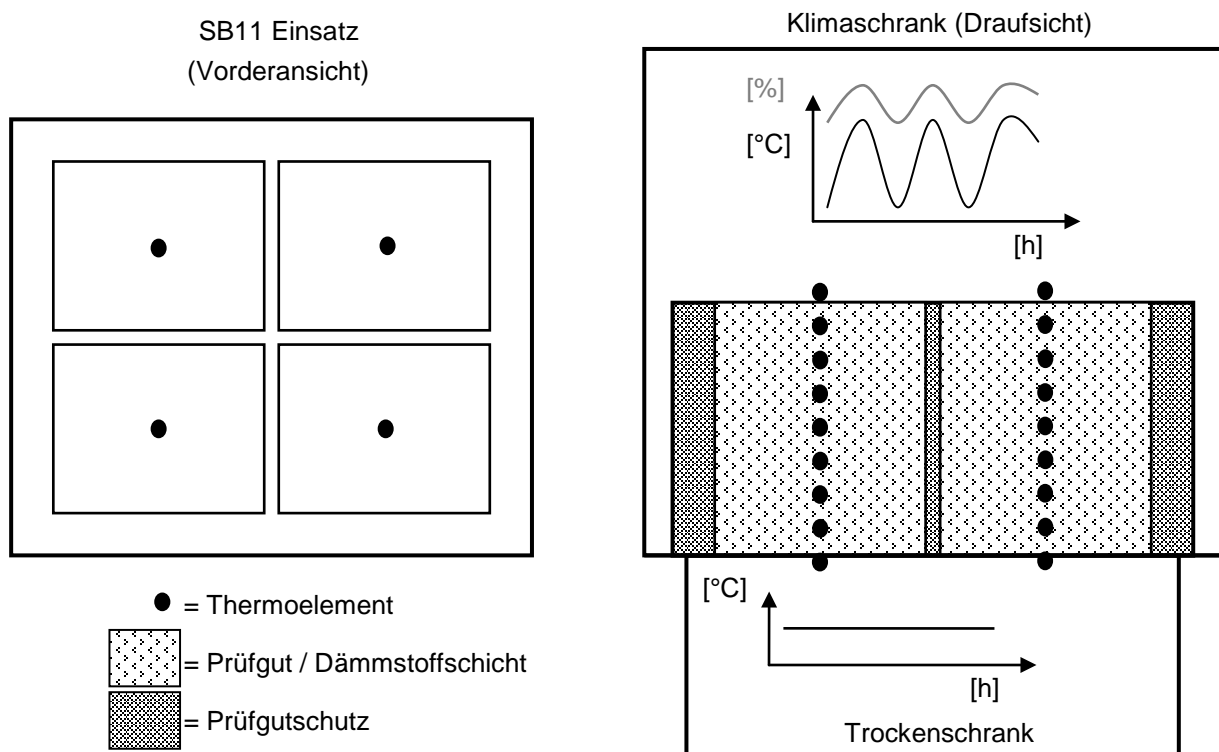


Abbildung 4-46 Prinzipskizze des Temperaturdifferenzprüfstandes, bestehend aus SB11 Klimaschrank, Einsatz zur Aufnahme der Kästen mit dem Prüfgut und davor angebrachtem Trockenschrank

In der Arbeit von SCHUNK 2009 konnte festgestellt werden, dass die durch eine Entfeuchtung der Materialien entstehende Verdunstungskälte die Messergebnisse zum Temperaturverhalten beeinflussen kann. Um vor diesem Hintergrund Aufwechungs- und Trocknungsprozesse zu vermeiden, wird, entsprechend dem Temperaturprofil, die relative Luftfeuchtigkeit so eingestellt, dass sich während der gesamten Messperiode ein konstantes  $u_{gl}$  einstellt, welches im Bereich des vorliegenden Raumklimas liegt. Das programmierte Temperaturprofil und die zugehörige relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank SB11 ist in Tabelle 4-10 dargestellt. Die Schritte eins bis neun werden insgesamt dreimal durchfahren.

Die in Abbildung 4-46 eingezeichneten Thermoelemente zur Temperaturlaufzeichnung sind jeweils axial zum Temperaturgradienten und im Flächenmittelpunkt der senkrecht dazu stehenden Messebenen angebracht und bestehen aus an den Spitzen hart verlötetem Thermodraht der Fa. ABB Automation Products GmbH, Typ K, nach DIN IEC 584, 2 x 0,20 mm Massivleiter. Um die sieben Messebenen in jeder Materialschicht exakt zu positionieren (alle 60 mm im Material) und gleichzeitig eine einfache Einbringung zu gewährleisten, werden Fichtenholzrahmen angefertigt, welche die Spitzen der Thermodrähte auf Position halten. Die Messpunkte zur Erfassung der Temperatur im Klimaschrank und im Trockenschrank sind in der gleichen Achse angeordnet und befinden sich im Abstand von ca. 2 cm über den begrenzenden Lochgittern.

Tabelle 4-10 Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofil zur Ermittlung des Temperaturverhaltens der Dämmschicht (Gesamtlaufzeit: 148 h)

Schritt	Zeit [h:min]	T [°C]	Zeit [h:min]	r. F. [%]
1	00:00	20	00:00	48
2	04:00	20	04:00	48
3	03:00	32	03:00	50
4	05:00	38	05:00	52
5	05:00	40	05:00	53
6	02:00	38	02:00	52
7	02:00	24	02:00	48
8	03:00	20	03:00	48
9	00:00	20	00:00	48
10	Loop; Zielschritt 1; WH 2		Loop; Zielschritt 1; WH 2	
11	00:00	20	00:00	48
12	04:00	20	04:00	48
13	00:30	30	00:30	50
14	23:30	30	23:30	50
15	00:30	10	00:30	46
16	23:30	10	23:30	46
17	00:30	30	00:30	50
18	23:30	30	23:30	50
19	ENDE		ENDE	

Die Temperaturlaufzeichnung über der Zeit wird mit einem Datenlogger der Fa. Linseis, Typ LSB 36 II, durchgeführt. Mit dem Gerät werden die Messstellen vor Versuchsbeginn auf die aktuelle Raumtemperatur, die mit einem Präzisionsthermometer der Fa. Assmann ermittelt wurde, kalibriert. Während der Versuchsdurchführung werden die Temperaturen aller Messstellen alle 60 s aufgezeichnet. Zur Berechnung der Einstreumenge an feuchtem Material wird mit der Schnelldarrwaage die Materialfeuchte bestimmt, um anschließend, unter Berücksichtigung des tatsächlich zur Verfügung stehenden Volumens (Abzug des Volumens der Positionierungsrahmen) und der angestrebten Einbringdichte, für jede Materialschicht repräsentative Probenmengen aufzubereiten. Das Material wird homogen eingestreut und mit Hilfe eines Pressstempels auf die entsprechende Höhe (60 mm je Schicht) verdichtet. Anschließend wird der an dem Fichtenholzrahmen befestigte Messpunkt eingelegt und die nächste Schicht wird entsprechend eingefüllt. Die Thermodrähte werden am Rand der Kiste über den Deckel nach außen geführt. Nach dem Einbau der Probenkästen in den SB11 Einsatz wird vor der Anordnung noch der Trockenschrank montiert und die Thermodrähte mit dem Datenlogger verbunden. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Trockenschrank wird mit einem Datenlogger der Fa. Rotronic aufgezeichnet.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Den ersten Teil der Untersuchung bildet ein Material- und Methodenscreening. In einem zweiten Teil werden an ausgewählten Materialvarianten weiterführende Versuche zu bauphysikalisch relevanten Materialeigenschaften durchgeführt.

### 5.1 Material- und Methodenscreening

In den folgenden Abschnitten wird ein breiter angelegtes Feld an potentiellen Mischungspartnern untersucht und bewertet. Dies soll zu grundlegenden Erkenntnissen über Setzungsprozesse und Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Partikelstrukturen und schließlich zu einer begründeten Auswahl der für die weiterführenden Versuche herangezogenen Materialien führen. Die Ergebnisse werden parallel zu ihrer Darstellung diskutiert.

#### 5.1.1 Volumenstabilität der Einzelmaterialien ermittelt auf dem Kleinprüfstand

Die unter der gewählten Versuchsanordnung volumenstabilen Dichten der untersuchten Einzelmaterialien sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Je Material wurden fünf Einzelversuche entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.1 durchgeführt. Die angestrebte Startdichte bei Versuchsbeginn entspricht mit Ausnahme der Materialien 03, 11 und 14 der in 4.1.1.3 ermittelten Schüttdichte.

Prinzipiell ist die Höhe der Belastung durch das Auflagergewicht bei einer rein vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Materialien von untergeordneter Bedeutung. Um über die ermittelten Werte aber eine möglichst realistische Aussage über die tatsächlich erforderliche volumenstabile Einbaudichte zu erhalten, wurde mit dem Material Altpapierflocken 09 das Auflagergewicht so lange variiert, bis sich unter den beschriebenen Randbedingungen eine Setzungsdichte nahe der vom Hersteller vorgegebenen maximal erforderlichen Einbaudichte von knapp  $60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  einstellt. Dieser Wert wurde mit einem Auflagergewicht von 1340 g erreicht. Unter der Voraussetzung, dass Altpapierflocken bei einer Einbaudichte von  $60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  erfahrungsgemäß ausreichend volumenstabil sind, kann die zum Erreichen dieser Verdichtung vorgenommene Beanspruchung als ausreichend praxisnah angesehen werden.

Bei den Materialien Bandsägespan 03, Miscanthusspan 11 und Flachsschäben 14 war die Streudichte der verwendeten Proben deutlich geringer als der mit der Vibrationsrinne ermittelte Wert, sodass an Stelle der in 4.1.1.3 vorliegenden Ergebnisse auch eine geringere Startdichte eingestellt werden musste, da eine Vorverdichtung auf den Schüttdichtewert nicht mehr zu sinnvollen Ergebnissen geführt hätte. Ein Erklärungsversuch beschränkt sich hier auf die unterschiedlichen Einstreuparameter, insbesondere die Fallhöhe der Späne beim Einstreuen mit der Vibrationsrinne.

Bei der Prüfung des Materials Lärche Hobel-/Bandsägespan 04 stellte sich beim Befüllen des Zylinders mit der Handschaufel ebenfalls eine geringere Dichte ein, als der mit der Vibrationsrinne ermittelte Wert. Hier war bereits vor der eigentlichen Prüfung eine relativ starke Vorverdichtung nötig, um die Startdichte zu erreichen. Im Gegensatz zu den Materialien 03, 11 und 14 konnte die Prüfung aber mit der geplanten Startdichte durchgeführt werden. Der Effekt könnte sich, wie bereits in 4.1.1.3 beschrieben, aus einem in den gezogenen Proben geringeren Anteil der Bandsägespankomponente erklären, der trotz vorangegangener Homogenisierung den Wert der Streudichte in den Proben signifikant reduziert hat, was bei gleicher Masse eine dementsprechende Erhöhung des Volumens bewirkt.



Tabelle 5-1 Ergebnisse der Prüfung zur Volumenstabilität der Einzelmaterialien auf dem Kleinprüfstand

	FES 01			Fichte Hobelspan 02		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	11,45	0,86	7,48 %	10,81	0,30	2,78 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	13,8	0,49	3,54 %	45,2	2,56	5,65 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	20,1	1,18	5,88 %	54,3	2,40	4,42 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	23,5	0,84	3,59 %	69,2	3,31	4,78 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	18,9	0,68	3,60 %	60,4	3,00	4,96 %
	Fichte Bandsägespan 03			Lärche Hobel-/Bandsägespan 04		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	12,05	0,22	1,83 %	11,65	0,51	4,42 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	211,1	4,76	2,25 %	105,4	0,65	0,62 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	218,0	4,38	2,01 %	107,7	1,13	1,05 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	254,0	5,09	2,00 %	118,8	3,79	3,19 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	251,3	5,41	2,15 %	110,8	4,30	3,88 %
	Fichte Kreissägespan 05			Hobeldämmspangemisch 06		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	7,93	0,20	2,52 %	10,41	0,32	3,06 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	146,2	0,20	0,14 %	33,7	0,14	0,41 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	146,2	0,20	0,14 %	39,1	0,94	2,40 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	185,1	3,06	1,65 %	47,7	0,94	1,98 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	177,4	2,11	1,19 %	41,3	1,04	2,52 %
	Holzstoff 07			Faserstoff 08		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	11,54	0,41	3,54 %	8,54	0,73	8,54 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	35,1	1,56	4,44 %	39,1	0,29	0,75 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	42,8	2,41	5,64 %	47,9	0,57	1,19 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	57,4	3,14	5,47 %	59,5	2,01	3,38 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	51,8	3,16	6,10 %	53,3	1,49	2,80 %
	Altpapierflocken 09			Wiesengrasdämmstoff 10		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	11,65	0,23	1,97 %	11,26	0,66	5,85 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	32,9	0,10	0,31 %	29,0	0,16	0,56 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	47,0	1,03	2,20 %	41,6	0,90	2,15 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	57,0	0,95	1,67 %	52,1	1,00	1,91 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	48,8	0,71	1,45 %	42,4	0,79	1,86 %
	Miscanthusspäne 11			Hanfschäben 12		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	12,03	0,17	1,37 %	11,31	0,24	2,12 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	129,0	1,20	0,93 %	96,3	0,24	0,25 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	131,9	1,22	0,93 %	97,3	0,61	0,63 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	151,9	1,39	0,92 %	112,8	7,69	6,82 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	154,7	1,56	1,01 %	108,6	0,42	0,39 %
	Hanffasern 13			Flachschäben 14		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	9,74	0,23	2,36 %	12,98	0,26	2,03 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	83,4	0,19	0,22 %	90,2	1,38	1,53 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	101,6	0,78	0,77 %	94,1	1,31	1,39 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	126,1	1,78	1,41 %	127,6	6,33	4,96 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	116,4	0,96	0,83 %	125,6	5,37	4,27 %

	Flachsfasern 15		
	$\bar{x}$	s	V
u [%]	9,60	0,28	2,89 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	51,1	1,61	3,16 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	70,3	0,94	1,34 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	90,7	1,46	1,60 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	78,8	0,96	1,22 %

Während der Versuchsdurchführung wurden Beobachtungen zum Versuchsablauf dokumentiert, die im Folgenden dargestellt und bewertet werden.

Der beschriebene Massenausgleich am Kleinprüfstand zur Sicherstellung einer vergleichbaren Vibrationsbeanspruchung (4.2.2.1) führt zu brauchbaren Ergebnissen, ist aber in der Kalibrierung umständlich, da eine Veränderung der Masse ein Abschalten des Vibrationsvorgangs und die Demontage des Prüfzylinders erfordert. Darüber hinaus ist die Regelungstechnik der AS 200 control nicht immer stringent. Es ist beispielsweise relevant, ob nach einer Änderung der Ausgleichsmasse die Maschine komplett ausgeschaltet oder vom Standby-Modus ausgehend hochgefahren wird. Die gemessenen Schwankungen der Amplitude betragen im Schnitt  $\pm 0,03$  mm ( $y = \pm 0,015$  mm), maximal bis zu  $+ 0,1$  mm ( $y = + 0,05$  mm) und  $- 0,05$  mm ( $y = - 0,025$  mm). Der Variationskoeffizient aller in dieser Messreihe gemessenen Amplituden beträgt 1,87 %, was, umgerechnet auf die Frequenz, einer Variation der Werte um  $\pm 0,47$  Hz entspricht. Diese Schwankung liegt bei einem Sollwert von rund 51,5 Hz immer noch innerhalb des nach 4.2.2.1 angestrebten Frequenzbereichs von 51,0 Hz - 52,0 Hz.

Bei der Prüfung des Materials FES 01 konnte festgestellt werden, dass ein Absetzen des Feinanteils vor allem während der Rückstellung bei entferntem Auflagergewicht zu beobachten war. Dies erklärt sich aus der starken Lockerung des Spangefüges und der damit einhergehenden Bildung von größeren Hohlräumen während des Rückstellvorgangs. In Bezug auf eine Bewertung der Separation bestimmter Partikelgrößen innerhalb eines Materialgemischs ist also auch die Einbringdichte zu berücksichtigen.

Für das Material Kreissägespan 05 konnte durch das Auflegen der Auflagerlast keine Dichteerhöhung festgestellt werden. Erst beim Start des Vibrationsvorgangs trat als Folge einer Umlagerung der Partikel hin zu einer dichteren Spänepackung eine Setzung ein. Eine Kompression durch elastische Verformung der sich federartig gegenseitig abstützenden Einzelpartikel findet bei diesem Material praktisch nicht statt.

Während der Vibrationsbeanspruchung lagerten sich bei dem Material Faserstoff 08 einzelne Fasern zu Agglomeraten zusammen, was zu einer unregelmäßig zerklüfteten Struktur innerhalb der Probe führte.

Die Miscanthusspäne 11 zeigten bei der Messung der Rückstellung nicht die erwartete Dichtereduktion. Vielmehr war eine deutliche weitere Verdichtung des Materials zu beobachten, was zu einer Rücksteldichte führt, die über der Setzungsdichte liegt. Verantwortlich hierfür ist, dass die Möglichkeit einer Umlagerung der Partikel erst nach der Entlastung durch das entfernte Auflagergewicht entsteht. Als Modellvorstellung könnte ein Brückenbogen herangezogen werden, der sich im belasteten Zustand selbst aussteift, unbelastet jedoch zusammensackt.

Der Variationskoeffizient [%] stellt die Standardabweichung der Einzelwerte bezogen auf den Mittelwert dar und fungiert als Maß für die Streuung. Bei der Startdichte sind aufgrund der beschriebenen Versuchsdurchführung mit homogenisierten Proben definierter Masse und

vorgegebenem Startvolumen keine hohen Variationskoeffizienten zu erwarten. Die vergleichsweise hohen Werte bei den Materialien 01 und 02 lassen sich auf die dabei andere Prüfmethodik zurückführen. Im Gegensatz zum beschriebenen Versuchsablauf wurde dort das Material lose eingestreut und anschließend nicht auf die Starteinstreuhöhe verdichtet. Da die Streudichte per Einstreuung von Hand in fast allen Fällen unter dem mit der Vibrationsrinne ermittelten Wert liegt, ergaben sich bei den ersten Versuchen leicht unterschiedliche Startstreuhöhen, weshalb die nachfolgenden Materialien, wie beschrieben, auf die exakte Einstreuhöhe vorverdichtet wurden. Bei den Materialien 03 und 14 schwanken aufgrund der eingangs beschriebenen Versuchsdurchführung die Probenmassen, was sich ebenfalls in erhöhten Variationskoeffizienten niederschlägt. Die Streuung der Materialien 07 und 15 bei der Startdichte sind bei erster Betrachtung unerklärlich. Eventuell erklären sich die Werte aus einer ungleichmäßigen Feuchteaufnahme oder –abnahme im Zuge der Klimatisierung.

Im Laufe der weiteren Versuchsschritte steigen die Variationskoeffizienten aller Materialien an. Dies folgt zumindest für den betrachteten Dichtebereich der Erwartung, da bei jedem weiteren Verdichtungsschritt neue und damit wieder variierende Einflussgrößen hinzukommen. Würde die Verdichtung weiter fortgeführt (bis in den Bereich der Rohdichte der Holzart oder gar bis zum Erreichen der Reindichte der Zellwand), so würden sich die Werte hingegen wieder homogenisieren.

Bei den Materialien 01, 02, 07 und 14 beeinflusst die hohe Streuung der Startdichte auch die weiteren Werte (Dichte belastet, Setzungsdichte und Rückstelldichte). Alle anderen Materialien zeigen hier im Mittel die geringeren Variationskoeffizienten.

Zusammenfassend kann nach der Auswertung der Variationskoeffizienten festgestellt werden, dass die Werte, von Ausreißern abgesehen, innerhalb des Erwartungshorizontes an die Reproduzierbarkeit der Prüfmethodik liegen.

Neben der Setzungsdichte als Absolutwert ist auch die Betrachtung der relativen Setzung, bezogen auf die Startdichte, interessant. In Abbildung 5-1 ist die prozentuale Setzung bezogen auf die Startdichte [%], dem Absolutwert [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] gegenübergestellt.

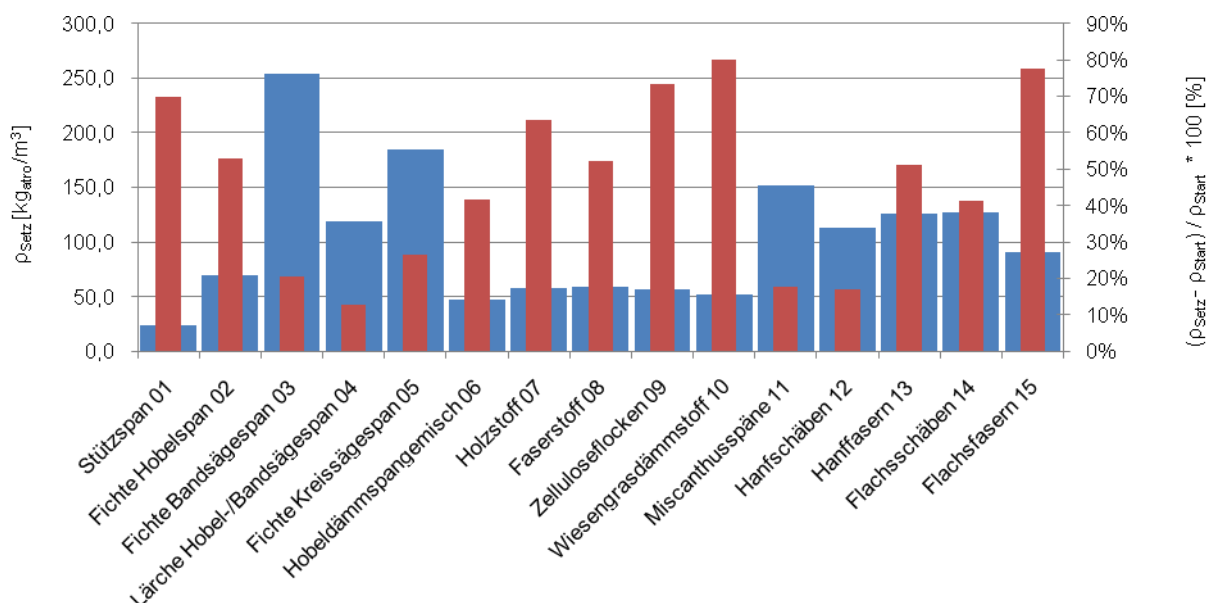


Abbildung 5-1 Gegenüberstellung von Setzungsdichte als Absolutwert [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] (linke Achse, breitere Säulen im Hintergrund) und prozentualer Setzung, bezogen auf die Startdichte [%] (rechte Achse, schlanke Säulen im Vordergrund)

Hierbei fällt auf, dass Materialien hoher Streudichte, bezogen auf ihre Streudichte, eine geringere Kompression erfahren als Materialien geringer Streudichte. Einem geringen Absolutwert steht also ein theoretisch höheres Setzungsmaß, bezogen auf Streudichte, gegenüber, andererseits sind aber bei geringen Streudichten auch entsprechend höhere Einbringdichten problemlos realisierbar.

In Abbildung 5-2 sind über alle geprüften Materialien hinweg die Dichte bei statischer Belastung und die Setzungsdichte nach Vibrationsbeanspruchung zur Streudichte, also der Startdichte bei Versuchsbeginn, ins Verhältnis gesetzt. Die Korrelationskoeffizienten betragen  $R = 0,988$  für den Zusammenhang „Setzungsdichte über Startdichte“ und  $R = 0,995$  für den Zusammenhang „Vorverdichtung über Startdichte“. Beide Werte müssten demnach auch untereinander gut korrelieren, was in Abbildung 5-2 auch zu erkennen ist – die dargestellten linearen Regressionskurven sind nahezu parallel verschoben. Der zugehörige Korrelationskoeffizient verdeutlicht mit  $R = 0,995$  ebenfalls den straffen Zusammenhang.

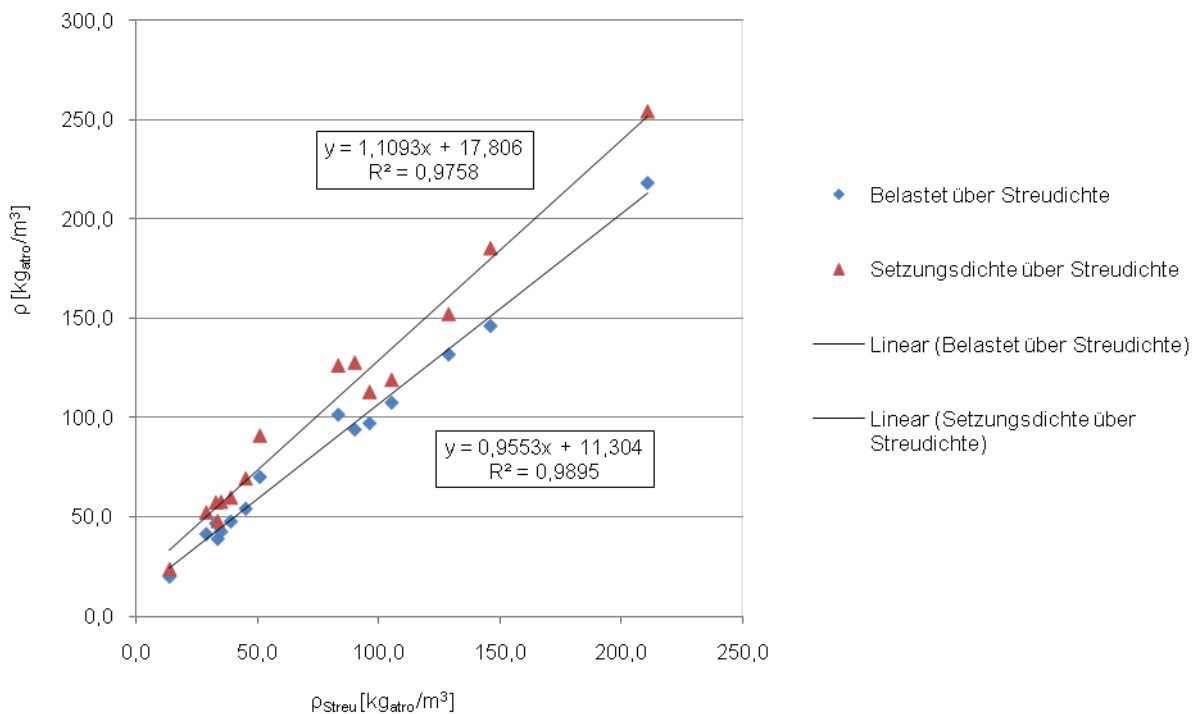


Abbildung 5-2 Korrelation zwischen Streudichte und Dichte nach Belastung durch das Auflagergewicht (1340 g) sowie Streudichte und Setzungsdichte (alle Materialien)

### 5.1.2 Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien

Die Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612 wurde für die Einzelmaterialien entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.5 in jeweils vier Versuchen gemessen. Die Einbringdichte wurde dabei ausgehend von der Schüttdichte sukzessiv erhöht. Das Ziel war die Ermittlung eines Dichtebereichs optimaler Wärmeleitfähigkeit.

In nahezu allen Fällen bietet ein Polynom 2. Grades die beste Regression für den Funktionsverlauf der Wärmeleitfähigkeit  $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$  aufgetragen über der Einbringdichte  $[\text{kgatro}/\text{m}^3]$ . Demnach können die Optimalbereiche der Wärmeleitfähigkeit über eine einfache Minimalwertsuche  $[\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}]$  ermittelt werden, wobei einige Materialien ihren Minimalwert bereits nahe der Schüttdichte erreichen. Jede weitere Erhöhung der Einbringdichte führt hier zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit.

In Anhang 1 sind die Wärmeleitfähigkeitswerte der gemessenen Einbringdichten und die ermittelten Minimalwerte angegeben. Minimalwerte, die rechnerisch außerhalb des untersuchten

Einbringdichtebereichs lagen, wurden nicht extrapoliert, sondern durch den niedrigsten gemessenen Wert ersetzt.

Da sich die untersuchten Materialien hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung und der Span- und Fasermorphologie stark unterscheiden, erscheint es sinnvoll, die Werte innerhalb verwandter Materialgruppen zusammenzustellen. Eine Aufteilung in die Kategorien Spanmaterialien (Hobel- und Sägespäne), Faserstoffe (Holzfasern, Altpapierfasern, alternative Fasern) und Sonstige (Miscanthusspäne, Wiesengrasdämmstoff, Hanf- und Flachsschäben) führt zu Kurvenverläufen entsprechend Abbildung 5-3 - Abbildung 5-5.

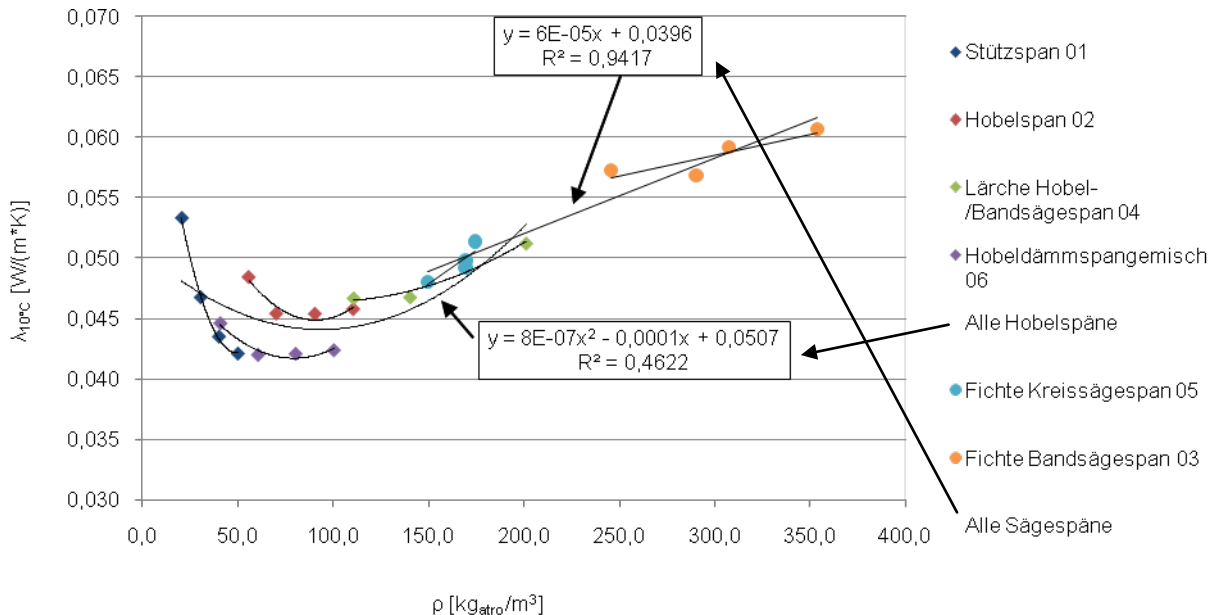


Abbildung 5-3 Wärmeleitfähigkeit der geprüften Hobelspanmaterialien in Abhängigkeit der Einbringdichte

Bei einer vergleichenden Betrachtung der interpolierten Regressionsfunktionen aller geprüften Spanmaterialien fällt auf, dass sich die Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Materialien an Anfang und Ende der untersuchten Rohdichtebereiche weitgehend sinnvoll ergänzen. Materialien geringer Streudichte (FES 01, Hobelspan 02, Hobeldämmspangemisch 06) weisen nahe ihrer Streudichte die höchsten Wärmeleitfähigkeiten auf und verringern diese bei steigender Einbringdichte, bis ein Minimalwert erreicht ist, ab dem die Werte wieder steigen. Materialien hoher Streudichte (Fichte Bandsägespan 03, Lärche Hobel-/Bandsägespan 04, Fichte Kreissägespan 05) starten nahe ihrer Schüttdichte mit Wärmeleitfähigkeitswerten, die im Bereich der Werte von Materialien geringerer Schüttdichten bei höheren Einbaudichten liegen.

Der aus dem Bestimmtheitsmaß durch Radizieren ermittelte Korrelationskoeffizient  $R$  beträgt für eine Ausgleichsfunktion, die alle geprüften hobelspanartigen Materialien (Kennz.: 01, 02, 04, 06) einschließt,  $R = 0,68$ . Bei den geprüften Sägespanmaterialien (Kennz.: 03, 05) erscheint der materialübergreifende Zusammenhang zwischen Einbringdichte und Wärmeleitfähigkeit straffer. Es stehen hier jedoch auch nur zwei Materialien zur Verfügung, die einen sehr breiten Rohdichtebereich ( $150 - 350 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ) abdecken und innerhalb der Einzelmateriale geringere Unterschiede aufweisen, als dies bei den Hobelspanmaterialien der Fall ist. Die nahezu lineare Regression ist mit einem Korrelationskoeffizient  $R = 0,97$  entsprechend straffer.

In Abbildung 5-4 sind entsprechend der Darstellungslogik in Abbildung 5-3 wieder die Ausgleichsfunktionen für alle geprüften Fasermaterialien zusammengestellt.

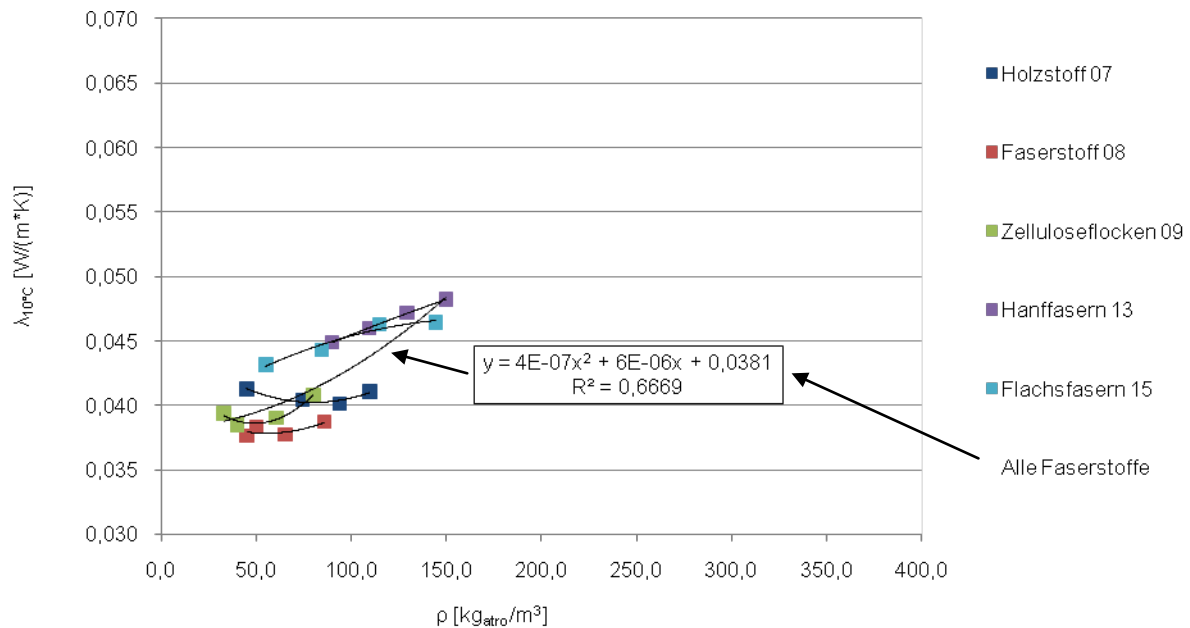


Abbildung 5-4 Wärmeleitfähigkeitswerte der geprüften Faserstoffe in Abhängigkeit der Einbringdichte

Als augenscheinlichster Unterschied fällt auf, dass die über alle geprüften Fasermaterialien hinweg ermittelte Ausgleichsfunktion, im Gegensatz zu dem gleichen Zusammenhang bei den Hobelspanmaterialien, kein Minimum innerhalb des geprüften Dichtebereichs aufweist. Auch die Unterschiede innerhalb eines Materials sind hier nicht so groß wie bei den Spanmaterialien. Die Regressionspolynome weisen zwar zumeist ein Minimum auf, sind aber allesamt flacher, als die in Abbildung 5-3 dargestellten Verläufe, was bei gleicher Achsenskalierung erkennbar ist. Insgesamt ist also die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dichte nicht in demselben Maß entscheidend, wie dies bei den Spanmaterialien der Fall ist. Der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang Wärmeleitfähigkeit über Einbringdichte bestimmt sich aus Abbildung 5-4 heraus zu  $R = 0,82$  und ist damit straffer als der für die Spanmaterialien ermittelte Wert.

In Abbildung 5-5 sind entsprechend der Darstellungslogik der beiden vorangegangenen Abbildungen wieder die Ausgleichsfunktionen für alle sonstigen geprüften Materialien zusammengestellt.

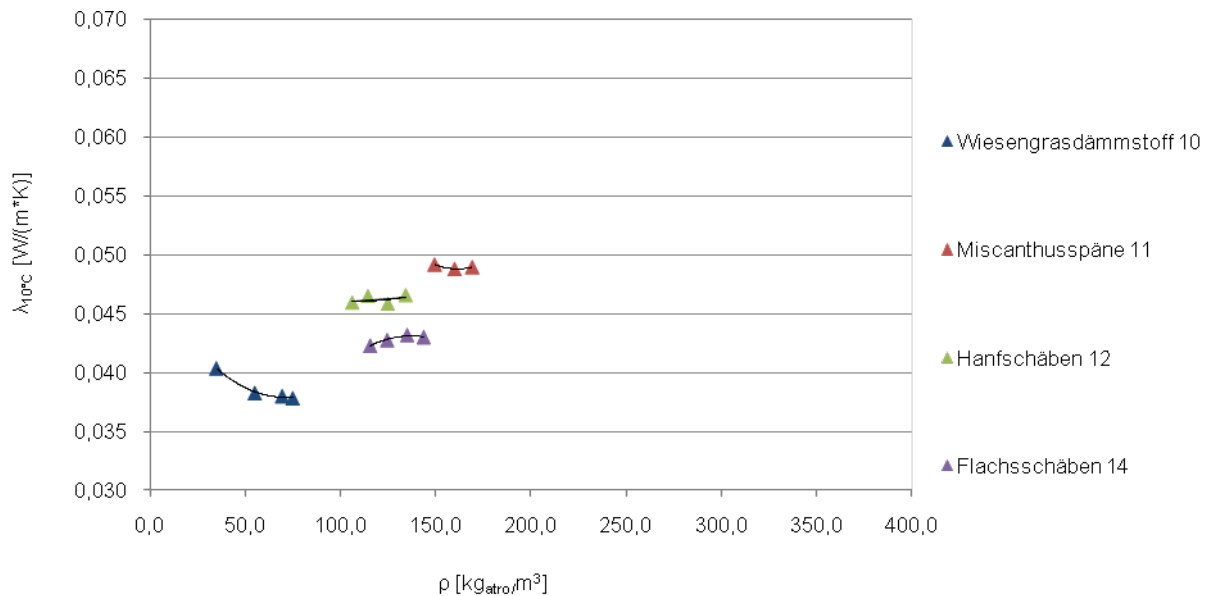


Abbildung 5-5 Wärmeleitfähigkeitswerte der sonstigen geprüften Materialien in Abhängigkeit der Einbringdichte

Für alle sonstigen geprüften Materialien führt eine getrennte Betrachtung der Einzelmaterialien zu folgenden Feststellungen. Das Material Wiesengrasdämmstoff 10 liegt seiner Struktur nach eher bei den Fasermaterialien. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt mit zunehmender Dichte, erreicht innerhalb der geprüften Dichten aber keinen ausgeprägten Optimalwert. Hanf- und Flachschäben sowie die Miscanthusspäne zeigen über den untersuchten Dichtebereich hinweg eine eher schwache Abhängigkeit von der Einbringdichte. Eine über alle Materialien zusammengefasste Regression ist aufgrund der sich stark unterscheidenden Partikelstrukturen nicht sinnvoll.

### 5.1.3 Überlegungen zur Kompositbildung – Bestimmung des Mischungsverhältnisses

Das Ziel bei der Bildung von Kompositdämmstoffen ist, wie beschrieben, eine Optimierung der Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Volumenstabilität, die durch eine gezielte Kombination unterschiedlicher Partikelstrukturen erreicht werden soll sowie eine damit einhergehende verbesserte Wirtschaftlichkeit, die sich einerseits aus der geringeren Einbringdichte und andererseits aus der teilweisen Substitution der Faserstoffsortimente durch die FES ergibt. Aus der Mischung mit einer aussteifenden Spankomponente können aber vor allem solche Materialien Vorteile ziehen, die ihre optimale Wärmeleitfähigkeit in einem Bereich entwickeln, der noch unterhalb der volumenstabilen Dichte liegt. In Tabelle 5-2 sind die relevanten Wertepaare gegenübergestellt. Den Materialdaten nach sinnvolle Kombinationen sind grün markiert.

Da es sich bei den als sinnvoll bewerteten Mischungspartnern, mit Ausnahme der Lärchen Hobel-/Bandsägespäne, durchgehend um Fasermaterialien handelt, wird, unter Berücksichtigung der Forderung zur Untersuchung eines ausreichend breiten Materialspektrums, außerdem noch das Spanmaterial Fichten Hobelspan 02 auf die Mischbarkeit und die erzielbaren Ergebnisse hin untersucht.

Tabelle 5-2 Auswahl der Mischungspartner

Mischungspartner	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$ [W/(m*K)]	bei	$\rho_{\text{Setz}}$	Mischung
		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	
Fichte Hobelspan 02	0,0464	83	69,2	zusätzlich
Fichte Bandsägespan 03	0,0568	290	254,0	Nein
Lärche Hobel-/Bandsägespan 04	0,0466	90	118,8	sinnvoll
Fichte Kreissägespan 05	0,0474	190	185,1	Nein
Hobeldämmspangemisch 06	0,0421	78	47,7	Nein
Holzstoff 07	0,0430	56	57,4	sinnvoll
Faserstoff 08	0,0379	56	59,5	sinnvoll
Altpapierflocken 09	0,0392	50	57,0	sinnvoll
Wiesengrasdämmstoff 10	0,0363	75	52,1	Nein
Miscanthusspäne 11	0,0398	190	151,9	Nein
Hanfschäben 12	0,0459	106	112,8	sinnvoll
Hanffasern 13	0,0449	90	126,1	sinnvoll
Flachsschäben 14	0,0423	115	127,6	sinnvoll
Flachsfasern 15	0,0432	55	90,7	sinnvoll

Bei der Bildung der Mischungsverhältnisse der ersten Versuchsreihe wird folgende Vorgehensweise herangezogen (Beispiel FES 01 + Faserstoff 08):

1. Annahme: setzungssichere Dichte des FES bei aufgerundet 25 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> (Wert aus Kleinprüfstand 23,5 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup>)
2. Annahme: Holzdichte für Fichte  $\rho_{12} = 450 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3 \Rightarrow \rho_{\text{atro}} \text{ ca. } 400 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$   
 $\Rightarrow 25 \text{ kg} / 400 \text{ kg}/\text{m}^3 = 0,0625 \text{ m}^3$  [Volumen für Mischungspartner A]  
 $\Rightarrow 0,9375 \text{ m}^3$  für Mischungspartner B verbleibendes Hohlraumvolumen je m<sup>3</sup>
3. Annahme: Der Hohlraum wird mit dem Mischungspartner B ideal ausgefüllt
4. Faserstoff erreicht bei Einbringdichten von 50 - 60 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> seine optimalen Wärmeleitfähigkeiten  
 $\Rightarrow 0,9375 \text{ m}^3 \times 55 \text{ kg}/\text{m}^3 = 51,56 \text{ kg}$   
 $\Rightarrow$  Mischungsverhältnis auf Masse atro: A / B = 25 kg / 51,56 kg = 1 / 2,06

In Anhang 12 befindet sich eine herausklappbare Tabelle, in der die Mischungsverhältnisse der Vorversuche dargestellt sind und eine Mischungskennziffer vergeben wird.

#### 5.1.4 Versuche zur Kompositbildung – Bestimmung der Mischgüte in einem diskontinuierlich arbeitenden Trommelmischer

Vor der eigentlichen Ergebnisdarstellung steht eine kurze qualitative Beschreibung der zum Mischverhalten durchgeführten Vorversuche.

Als Mischer stand ein sechseckiger Trommelmischer zur Verfügung. Die Geometrie der Mischertrommel entspricht dem später in den Großversuchen verwendeten Mischer. Die Mischerabmaße sind jedoch kleiner.



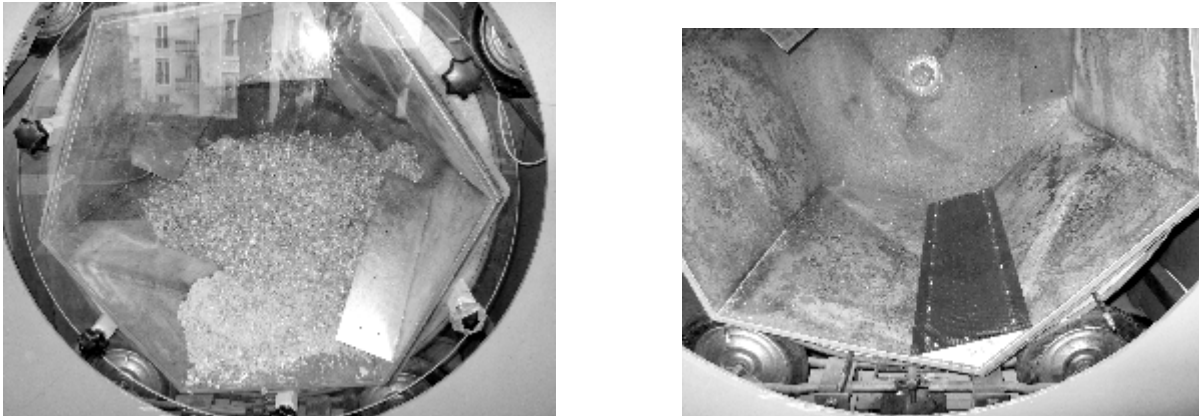


Abbildung 5-6 Links: Sechseckige Mischertrommel mit eingebauten Leitblechen; Rechts: Einbau zur Drucklufteinblasung über die Mischerecke

Ohne eingebaute Leitbleche findet innerhalb einer Tiefenebene des Mixers eine gute Durchmischung der Späne durch das ständige Übereinanderwerfen des sich in Rotationsrichtung brechenden Spanstromes statt. Die Durchmischung der vorne und hinten liegenden Bereiche ist allerdings ungenügend, was gut zu erkennen ist, wenn die Komponenten vorne und hinten getrennt eingefüllt werden. Der Einbau von Leitblechen, die um jeweils 45° versetzt (Abbildung 5-6) den Spanstrom immer wieder von vorne nach hinten und umgekehrt lenken, wurde in Vorversuchen als ideal empfunden, dieses Problem zu lösen. In Tabelle 5-3 sind die Mischerabmessungen und andere Daten zum Mischprozess dargestellt.

Tabelle 5-3 Mischerabmaße und Befüllgrad (Material- und Methodenscreening)

Trommelmaße Sechseck:	
Kantenlänge [m]:	0,6
Tiefe [m]:	0,8
Mischervolumen [m <sup>3</sup> ]:	0,7482
Befüllgrad [%]:	15
Trommeldrehzahl [1/min]:	21

Neben den verwendeten Mischereinbauten wurden auch Versuche zur Unterstützung des Mischeffektes durch Drucklufteinblasung in den Trommelmischer vorgenommen. Erste Versuchsreihen beschäftigten sich mit einer gleichmäßigen Druckluftbeaufschlagung ganzer Flächen und einer Ecke des sechseckigen Trommelmischers mit dem Ziel, eine Anhebung des Spangutes beim Durchlaufen des Druckluftelementes zu erreichen, um so die Durchmischung durch den Abrolleffekt des sich brechenden Spanstroms durch eine Aufwirbelung von unten, also 90° gedreht zur sonstigen Mischerbewegung, zu erreichen. Bei der praktischen Durchführung zeigte sich aber, dass der mittels Druckluft erreichbare Volumenstrom zu gering ausfällt, um die Späne sinnvoll anzuheben oder eine andere Art der Durchmischung zu erzeugen. Auch eine theoretische Betrachtung der vorgenommenen Drucklufteinblasung bestätigte die negativen Ergebnisse. Der einer Luftgeschwindigkeit von 20 m/s (Wert aus der Absaugtechnik – ab hier wird ein vollständiger Spantransport erreicht) zugehörige Leitungsdurchmesser berechnet sich für die Einblasung über die Ecke (Maße des Einblaselements 1,0 m x 0,1 m mit 22,65 % freier Fläche) und einem verfügbaren Maximaldruck von 7,5 bar auf 68,23 mm Innendurchmesser der Zuführleitung. Dieser Querschnitt wird mit der vorhandenen Anlage nicht erreicht. Die Druckluftbeaufschlagung einer ganzen Teilfläche des Mixers würde einen noch größeren Volumenstrom erfordern.

Neben der flächigen Beaufschlagung wurden auch Versuche mit punkt- und schlitzförmigen Düsen in Rohren durchgeführt. Die zur Verfügung stehende Luftmenge konnte zwar so eingestellt werden, dass Späne angehoben wurden, das Herausreißen einzelner Späne durch den kegelförmigen Druckluftstrahl führte aber nicht zu einer sinnvollen Unterstützung des Mischeffektes. Weder ein bemerkenswertes Verschieben von Faserknäueln noch ein Auflösen agglomerierter Faserknäuel, beispielsweise bei Hanf- und Flachsfasern, konnte beobachtet werden.

Im Rahmen der Vorversuche wurde für die untersuchten Mischungen die Mischgüte als Funktionsverlauf über der Zeit bestimmt. Die Probenziehung und die Bestimmung der Mischgüte erfolgen entsprechend Punkt 4.1.5. In Abweichung zur beschriebenen Methodik wird bei den geprüften Spanmaterialien die Siebmaschenweite zur Trennung der Komponente A auf 7100 µm erhöht, da hier bei 5000 µm eine Überschneidung der Siebkennlinien eintritt. Das Material könnte sonst von Hand nicht mehr sinnvoll auszusortiert werden. Die Probenziehungen erfolgten mit drei Stichproben des Volumens 1 dm<sup>3</sup> jeweils nach 15 s, 30 s, 60 s, 120 s und 180 s. Die untersuchte Mischzeit wurde auf 180 s festgelegt, da bereits ab ca. 30 – 60 s Mischerlaufzeit visuell keine sichtbare Verbesserung des Mischergebnisses mehr festzustellen war – ein Eindruck der schließlich auch von den durchgeführten Mischgüteanalysen bestätigt wurde.

In Anhang 2 ist die mittlere gemessene Konzentration  $\bar{c}_k$  der gezogenen Stichproben, die Konzentration der Grundgesamtheit  $c_{Gg}$  sowie die geschätzte empirische Streuung  $s_k^2$  abzulesen. Aus den Werten ergibt sich graphisch dargestellt ein Verlauf von  $s_k^2$  entsprechend Abbildung 5-7.

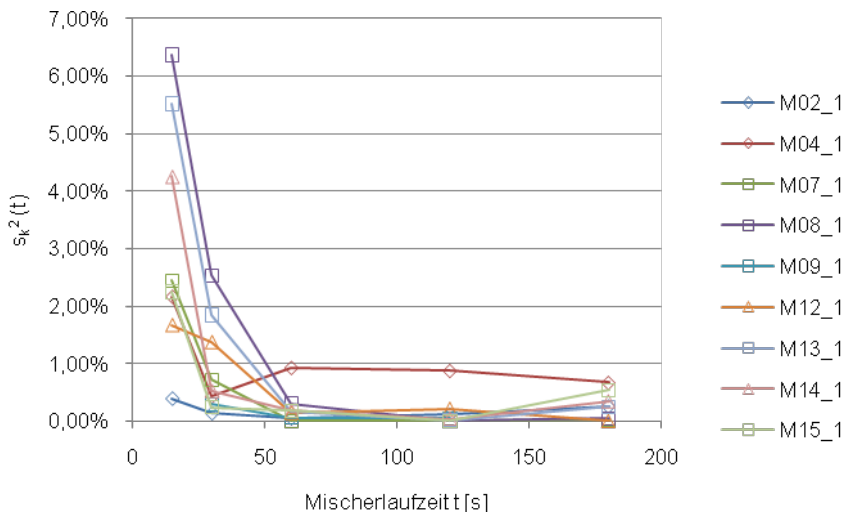


Abbildung 5-7 Mischgüteverlauf – Darstellung der geschätzten empirischen Streuung  $s_k^2$  über der Mischzeit, bezogen auf eine Probengröße von 1dm<sup>3</sup>

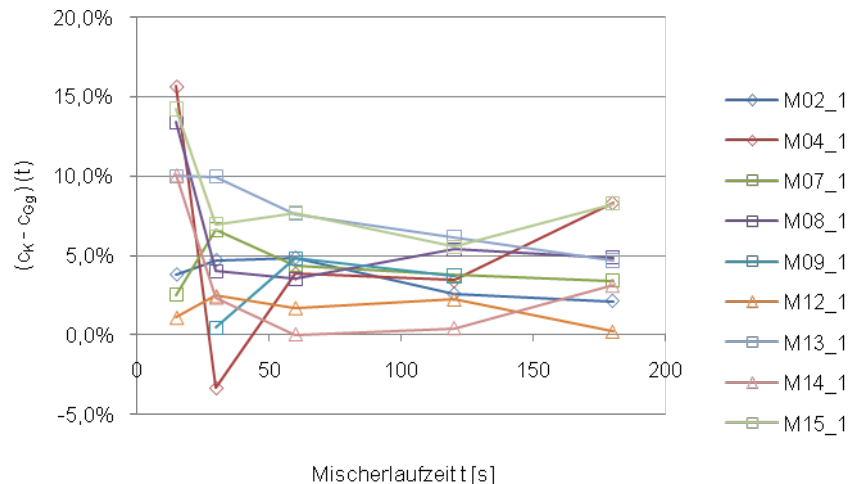


Abbildung 5-8 Mischgüteverlauf – Darstellung der Differenz  $\bar{c}_K - c_{Gg}$  über der Mischzeit, bezogen auf eine Probengröße von  $1 \text{ dm}^3$

Es ist zu erkennen, dass lediglich in den ersten 60 s des Mischprozesses eindeutige Unterschiede zwischen den Materialien bestehen. Ab ca. 60 s Mischzeit schwenken alle Materialien auf das endgültig erreichbare Mischgüteniveau ein. Nach 120 s Mischzeit lässt sich ein schwach ausgeprägter Optimalbereich erkennen.

Bei praktisch allen Materialien ist über der Mischzeit eine Annäherung der mittleren gemessenen Konzentration  $\bar{c}_K$  an die Konzentration der Grundgesamtheit  $c_{Gg}$  zu beobachten. Einige Materialmischungen (M04\_1, M14\_1 und M15\_1) scheinen jedoch auch bezüglich dieses Kriteriums einen Optimalbereich zu entwickeln, da hier die Werte bei längerer Mischerlaufzeit wieder steigen. Eine Schädigung der auf ihre Verteilung im Materialgemisch hin untersuchten FES konnte auch nach 180 s Mischzeit nicht festgestellt werden. Neben einer subjektiven Beurteilung des Spanzustandes, lässt sich aus Abbildung 5-8 auch erkennen, dass die Konzentration der Komponente FES 01 (von Mischung M04\_1 abgesehen) nie unter die Konzentration in der Grundgesamtheit fällt.

### 5.1.5 Volumenstabilität der Mischungen, ermittelt auf dem Kleinprüfstand

Die Prüfung der Volumenstabilität der Mischungen erfolgte entsprechend den Versuchen der Einzelmaterialien in jeweils fünf Einzelversuchen je Materialvariante. Entgegen der unter Punkt 4.1.1 beschriebenen Methodik wurde die Probennahme aber nicht durch die Berechnung der feuchten Masse auf Basis der mittels Vibrationsrinne bestimmten Streudichte und anschließender repräsentativer Probenziehung aus der zur Verfügung stehenden Grundgesamtheit vorgenommen. Da der Wert der Streudichte der Kompositmaterialien direkt nach der Mischung nicht zur Verfügung steht, wurde das Material direkt nach dem Mischprozess aus der Mischertrommel entnommen und in kleinen Chargen klimatisiert. Weil der Einfluss des Kegeln und Viertelns auf die Stabilität der Mischungen nicht bekannt ist, wurde auch keine Homogenisierung des Materials vorgenommen. Die jeweiligen Mischungsverhältnisse sind über die Mischungskennziffern zuzuordnen und entsprechen den in Tabelle 5-4 dargestellten Massenverhältnissen, bezogen auf atro Span- beziehungsweise Fasermasse.

Tabelle 5-4 Ergebnisse der Prüfung zur Volumenstabilität der Mischungen der Vorversuche auf dem Kleinprüfstand

	M02_1			M04_1		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	10,87	0,31	2,89 %	11,46	0,71	6,21 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	28,44	0,87	3,07 %	41,81	1,95	4,66 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	38,62	1,31	3,39 %	51,46	1,89	3,67 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	47,29	1,73	3,67 %	67,39	3,92	5,81 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	39,22	1,76	4,48 %	57,12	3,23	5,65 %
	M07_1			M08_1		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	11,44	0,75	6,54 %	9,73	0,94	9,64 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	24,31	1,14	4,69 %	26,12	0,69	2,64 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	34,63	0,42	1,22 %	36,28	0,62	1,71 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	43,46	1,21	2,79 %	45,96	1,02	2,22 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	36,42	1,28	3,53 %	37,88	1,00	2,63 %
	M09_1			M12_1		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	9,67	1,01	10,43 %	11,33	0,38	3,32 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	22,32	0,36	1,62 %	48,73	1,63	3,35 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	36,12	0,40	1,10 %	57,75	2,31	4,00 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	44,56	0,79	1,77 %	74,58	3,55	4,76 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	35,66	0,65	1,83 %	67,27	2,82	4,19 %
	M13_1			M14_1		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
u [%]	8,32	0,29	3,43 %	11,39	0,76	6,68 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	36,28	1,47	4,06 %	52,30	1,96	3,75 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	51,70	1,88	3,63 %	61,50	1,89	3,06 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	69,68	2,38	3,42 %	85,55	2,08	2,43 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	58,39	2,85	4,87 %	74,81	1,51	2,01 %
	M15_1					
	$\bar{x}$	s	V			
u [%]	7,86	0,52	2,23 %			
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	24,59	0,62	6,66 %			
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	40,47	0,41	2,50 %			
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	50,77	0,88	1,01 %			
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	40,19	0,80	1,72 %			

Bei der Mischung M08\_1 (FES 01 + Faserstoff 08) trat im Lauf des Vibrationsvorgangs eine ausgeprägte Hohlrumbildung auf (Abbildung 5-9). Der Effekt resultiert dabei aus einer Zusammenlagerung der Holzfasern innerhalb der durch das FES offen gehaltenen Hohlräume. Die Bildung von Agglomeraten bei dem verwendeten Faserstoff wurde schon unter Punkt 5.1.2 bei der Prüfung der Einzelmaterialien beschrieben. Das Problem einer Ausbildung von ungefüllten Zwischenräumen trat, wenn auch deutlich geringer ausgeprägt, im Prinzip bei allen geprüften Mischungen auf. Fasermaterialien neigen dabei zur beschriebenen Agglomerierung, während bei Spanmaterialien vor allem ein Absetzen feinerer Späne für die Hohlrumbildung verantwortlich ist, wobei dies fast ausschließlich am Anfang des Verdichtungs Vorgangs zu beobachten war. Neben den berücksichtigten Materialeigenschaften, dem Setzungsverhalten und der Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien, müssen also auch andere Materialspezifika, wie die Dichte eventuell auftretender Agglomerate, berücksichtigt werden.



Abbildung 5-9 Hohlräume innerhalb der Matrix des FES durch agglomerierten Faserstoff

### Streudichte der Mischungen

Rechnet man den Wert der Streudichte der Mischungen unter Berücksichtigung der Massenverhältnisse auf den Anteil der Komponente A (FES 01) zurück, so erhält man die partielle Dichte des FES 01 in Mischung, entsprechend der Tabelle 20.

Tabelle 5-5 Anteil der Komponente FES 01 an der Streudichte der untersuchten Mischungen

Mat.kennz.	02_1	04_1	07_1	08_1	09_1	12_1	13_1	14_1	15_1	$\bar{x}$	s
$\rho_{\text{Streu}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	28,4	41,8	24,3	26,1	22,3	48,7	36,3	52,3	24,6	-	-
$\rho_{\text{part FES 01}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	6,9	9,6	7,9	8,5	7,8	9,8	8,3	9,8	8	8,5	1,02

Auffällig sind hier die relativ konstanten Werte der Dichteanteile der Komponente FES trotz unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Materialstrukturen der Kompositpartner. Im Weiteren fällt auf, dass die partielle Dichte des FES 01 in Mischung unter dem Wert der Streudichte des Einzelmaterials liegt.

### Setzungsdichte der Mischungen

Errechnet man auch für die Setzungsdichten den Anteil der Komponente FES 01 an der Setzungsdichte der untersuchten Mischungen, so zeigt sich, dass die Dichte der Komponente 01 unabhängig von den eingebrachten Materialien und den Mischungsverhältnissen, zwischen 1 : 1,9 und 1 : 4,0 , relativ konstant um den Wert  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  pendelt. Der Wert von  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  ist unter der gewählten Logik zur Bildung der Mischungsverhältnisse anscheinend ein Charakteristikum für den Dichteanteil der Komponente FES (Tabelle 5-6).

Tabelle 5-6 Anteil der Komponente FES 01 an der Setzungsdichte der untersuchten Mischungen

Mat.kennz.	02_1	04_1	07_1	08_1	09_1	12_1	13_1	14_1	15_1	$\bar{x}$	s
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	47,3	67,4	43,5	46	44,6	74,6	69,7	85,6	50,8	-	-
$\rho_{\text{part FES 01}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	11,5	15,4	14,1	14,9	15,5	15	15,9	16,1	16,6	15	1,5

Bezogen auf die beobachtete Hohlräumbildung im Gefüge durch Faseranhäufungen stellt sich die Frage, inwieweit das bei  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  vorhandene Hohlräumvolumen vom Mischungspartner B überhaupt noch aufgefüllt werden kann. Bei einer Dichte von  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  beansprucht das FES ein absolutes Volumen von  $0,0375 \text{ m}^3$  (für  $\rho_{\text{atroFichte}} = 400 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ). Für den Kompositpartner verbleiben in

diesem Fall  $0,9625 \text{ m}^3$  freier Hohlraum. Die Mischungsverhältnisse wurden aber unter der Voraussetzung eines freien Hohlraumes von  $0,9375 \text{ m}^3$  gebildet, weshalb die Differenz von  $0,025 \text{ m}^3$  den Unterschied zwischen minimaler Schüttdichte und der eingebrachten Dichte optimaler Wärmeleitfähigkeit nicht überschreiten sollte, da sonst zwangsläufig ungefüllte Bereiche entstehen. Für die untersuchten Mischungen sind die Verhältnisse in Tabelle 5-7 dargestellt.

Tabelle 5-7 Bildung ungefüllter Hohlräume durch eine niedrigere partielle Dichte des FES

Mat.kennz.:	02_1	04_1	07_1	08_1	09_1	12_1	13_1	14_1	15_1
$\rho_{\text{part}}$ Soll Material B [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]	83	90	56	56	50	106	90	115	55
$\rho_{\text{part}}$ Ist Material B [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]	80	88	54	54	49	103	88	112	54
$\rho_{\text{Streu}}$ Material B [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]	48,0	105,6	35,6	38,9	32,5	96,5	82,9	109,6	49,7
Prüfung	o.k.	kritisch	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.	o.k.

Wie zu sehen, findet durch den beschriebenen Effekt keine kritische Dichtereduktion (Partielle Ist-dichte Material < Streudichte Material B) statt. Bei der Mischung M04\_1 muss erwähnt werden, dass hier mit  $90 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  eine Dichte eingebracht wurde, die ohnehin unter der Streudichte von  $105,6 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  liegt. Zudem ist hier wieder in hohem Maß der Anteil an Bandsägespänen für die erreichten Dichtestufen entscheidend.

### 5.1.6 Orientierende Aussagen zum hygroskopischen Verhalten

Da bei allen Versuchen (Streudichte bei 20/65, Volumenstabilität bei 23/50, Mischungsverhalten bei Raumklima) die Materialfeuchten aufgenommen wurden, können diese Ergebnisse zusammengefasst werden, um so orientierende Aussagen zum hygroskopischen Verhalten der untersuchten Materialien einzeln und in Mischung zu erhalten. Die Ausgleichsfeuchten der Einzelmaterialien in den Klimata 20/65 und 23/50 sind in Tabelle 5-8 dargestellt.

Tabelle 5-8 Ausgleichsfeuchten der Einzelmaterialien bei 23/50 und 20/65

Mat. kennz.	Bezeichnung	20/65			23/50		
		$\bar{x}$ [%]	s [%]	V	$\bar{x}$ [%]	s [%]	V
01	FES	12,9	0,28	2,15 %	11,5	0,86	7,48 %
02	Fichte Hobelspan	13,5	0,35	2,60 %	10,8	0,30	2,78 %
03	Fichte Bandsägespan	14,0	0,09	0,63 %	12,1	0,22	1,83 %
04	Lärche Hobel-/Bandsägespan	13,7	0,08	0,59 %	11,6	0,51	4,42 %
05	Fichte Kreissägespan	10,9	0,03	0,31 %	7,9	0,20	2,52 %
06	Hobeldämmspangemisch	14,2	0,47	3,33 %	10,4	0,32	3,06%
07	Holzstoff	13,2	0,30	2,28 %	11,5	0,41	3,54 %
08	Faserstoff	10,7	0,10	0,90 %	8,5	0,73	8,54 %
09	Altpapierflocken	12,2	0,08	0,66 %	11,7	0,23	1,97 %
10	Wiesengrasdämmstoff	12,3	0,26	2,13 %	11,3	0,66	5,85 %
11	Miscanthusspäne	12,9	0,03	0,25 %	12,0	0,17	1,37 %
12	Hanfschäben	12,9	0,04	0,34 %	11,3	0,24	2,12 %
13	Hanffasern	11,7	0,02	0,21 %	9,7	0,23	2,36 %
14	Flachsschäben	14,2	0,07	0,52 %	13,0	0,26	2,03 %
15	Flachsfasern	11,4	0,09	0,80 %	9,6	0,28	2,89 %

Es ist zu beobachten, dass sich Faserstoffe (Faserstoff, Hanf-, Flachsfasern) tendenziell trockener einstellen als Spanmaterialien (Ausnahme: Kreissägespan 05). Der Feuchtegehalt der restlichen Materialien liegt dazwischen.

### 5.1.7 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse des Materialscreening

Es standen unterschiedliche Span- und Fasersortimente zur Verfügung, die sowohl als Einzelmaterial als auch in Mischung mit dem Material FES 01 untersucht wurden. Ermittelt wurde an den Einzelmaterialien die Streudichte, die Volumenstabilität auf dem Kleinprüfstand und die Wärmeleitfähigkeit. Mit ausgewählten Materialien wurden Mischungen hergestellt, deren Mischungsverhältnis unter dem Optimierungsgedanken einer Stabilisierung des Dichtebereichs optimaler Wärmeleitfähigkeit des Kompositpartners B gebildet wurden. Im Fokus stand in erster Linie die Untersuchung des Mischungsverhaltens, d. h. die prinzipielle Mischbarkeit und der Mischgüteverlauf als Funktion der Mischzeit, sowie das Setzungsverhalten der hergestellten Mischungen.

Alle untersuchten Materialien lassen sich in dem verwendeten sechseckigen Trommelmischer mit eingebauten Mischleitblechen mit dem FES in Mischung bringen. In jedem Fall lässt sich eine ausreichende Mischgüte erzielen, ohne dass eine der beteiligten Komponenten durch den Mischprozess augenscheinlich Schaden nimmt.

Die untersuchten Einzelmaterialien weisen Streudichten von  $13,7 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (FES 01) bis  $236,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (Fichte Bandsägespan 03) auf. In Mischung gebracht, reduzieren sich die Streudichten der auf diese Weise hergestellten Kompositmaterialien deutlich.

Das angewendete Verfahren zur Ermittlung der Volumenstabilität auf dem Kleinprüfstand (siehe Punkt 4.2.2.1) weist ein ausreichendes Differenzierungspotential auf und führt zu reproduzierbaren Werten. Bezogen auf ihre Streudichte weisen Materialien hoher Streudichte die geringsten relativen Setzungsmaße auf, Materialien niedriger Streudichte die höchsten. Der Zusammenhang ist also umgekehrt proportional. Direkt proportional verhalten sich hingegen die Absolutwerte der Setzungsdichte. Der Zusammenhang Setzungsdichte über Streudichte korreliert sehr streng. Ebenfalls gut korreliert ist der Zusammenhang zwischen der Vorverdichtung der Materialsäule durch das Auflagergewicht und der sich anschließend einstellenden Setzung durch die Vibrationsbeanspruchung.

Zur Agglomerierung neigende Materialien führen in Mischung mit dem großvolumigen FES zu Schwierigkeiten, da sich im Lauf der Vibrationsbeanspruchung durch die Zusammenlagerung der eingebrachten Fasern innerhalb der relativ großen Hohlräume des FES unausgefüllte Hohlräume ausbilden können. Dies tritt auf, wenn die partielle Solldichte der Fasern in der Mischung kleiner ist als die Dichte der entstehenden Agglomerate.

Eine nennenswerte Entmischung der beteiligten Mischungspartner während der Vibrationsbeanspruchung konnte nicht festgestellt werden. Lediglich am Anfang des Vibrationsvorgangs und im Zuge der Rückstellung konnte bei Spanmaterialien ein Absetzen von Feianteilen beobachtet werden. Der Grund hierfür liegt in der jeweils relativ lockeren Materialmatrix. Im verdichteten Zustand waren keine nennenswerten Separierungseffekte mehr zu beobachten. Fasermaterialien zeigten insgesamt die geringsten Separierungen.

Das FES wird innerhalb der Mischung nicht auf die Setzungsdichte als Einzelmaterial verdichtet, sondern stabilisiert sich bereits bei einer Dichte von etwa  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ . Dieser Wert wird innerhalb der angewendeten Logik zur Bildung der Mischungsverhältnisse unabhängig von den gemischten Materialien und den damit schwankenden Mischungsverhältnissen erreicht.

Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit ist auffällig, dass der Einfluss der Einbringdichte auf die Wärmeleitfähigkeit bei Fasermaterialien schwächer ausfällt als bei den Hobelspanmaterialien. Ein Grund hierfür könnte in der insgesamt dichteren Zusammenlagerung und Verfilzung der Faserbündel zu suchen sein, deren Hohlraumbildung sowie die Ausbildung von interpartikulären Kontaktflächen

oder Kontaktlinien nicht in dem gleichen Maß von der Einbringdichte abhängt, wie dies bei den Spanmaterialien der Fall ist. Außerdem bestätigt sich der hinreichend dokumentierte Zusammenhang, dass die Wärmeleitfähigkeit bei Faserstoffen vor allem von der Feinheit der Fasern abhängig ist. (siehe hierzu auch 3.1.1)

Die Materialfeuchten der Einzelmaterialien innerhalb der Mischung verhalten sich spezifisch, sodass sich je nach individuellem Sorptionsverhalten eine für Komponente A und B unterschiedliche Ausgleichsfeuchte einstellen sollte. Prinzipiell weisen Materialien ähnlichen Sorptionsverhaltens in diesem Zusammenhang Vorteile auf – allerdings waren die gemessenen Unterschiede auch relativ klein: Selten werden 2 % Abweichung überschritten.

### 5.1.8 Auswahl der Materialien für weiterführende Versuche

Die Basis des Auswahlprozesses bildet eine gewichtete Bewertungsmatrix, in der die ermittelten Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit (Einzelmaterial) und volumenstabile Dichte (Einzelmaterial) einander gegenübergestellt werden (Tabelle 5-9).

Tabelle 5-9 Bewertungsmatrix zu ausgewählten Eigenschaften des durchgeführten Materialscreenings

Eigenschaft	$\lambda$	$\rho_{\text{Setz}}$	Punktzahl
Gewichtung	1,00	1,00	
Faserstoff 08	10,00	9,68	19,68
Altpapierflocken 09	9,01	10,00	19,01
Holzstoff 07	6,05	9,96	16,00
Fichte Hobelspan 02	3,43	8,45	11,88
Flachfasern 15	5,92	5,70	11,62
Flachsschäben 14	6,62	1,00	7,62
Hanffasern 13	4,58	1,19	5,77
Lärche Hobel-/Bandsägespan 04	3,31	2,12	5,43
Hanfschäben 12	1,00	2,89	3,89

Das beste Ergebnis der jeweiligen Eigenschaftsgruppe wird mit zehn Punkten, das schlechteste mit einem Punkt bewertet. Dazwischen sind die Punktezahlen aufgrund des prozentualen Abstands der erreichten Werte, bezogen auf den größten Abstand innerhalb der Eigenschaftsgruppe, vergeben. Die insgesamt beste Bewertung erreichen das Material Faserstoff 08 und Altpapierflocken 09, obwohl hier im Vergleich das geringste Optimierungspotential gegeben ist. Eine Reduzierung der Materialmatrix auf drei Kompositpartner für die folgenden weiterführenden Versuche führt zu den Materialien Fichtenhobelspäne 02, Faserstoff 08 und Altpapierflocken 09. Das Material Holzstoff 07 wird aufgrund der relativ geringen wirtschaftlichen Bedeutung nicht weiter untersucht.

## 5.2 Versuche mit ausgewählten Materialvarianten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der weiterführenden Versuche mit ausgewählten Einzelmaterialien sowie daraus hergestellter Mischungen vorgestellt. Die Mischungen wurden mit einem sechseckigen Trommelmischer erzeugt. In jede Innenseite des hexagonalen Prismas ist, wie in den Vorversuchen, als Mischwerkzeug abwechselnd zur Vorder- und Rückseite im Winkel von 45° ein Mischleitblech eingebaut. Abbildung 5-10 zeigt die verwendete Mischertrommel.



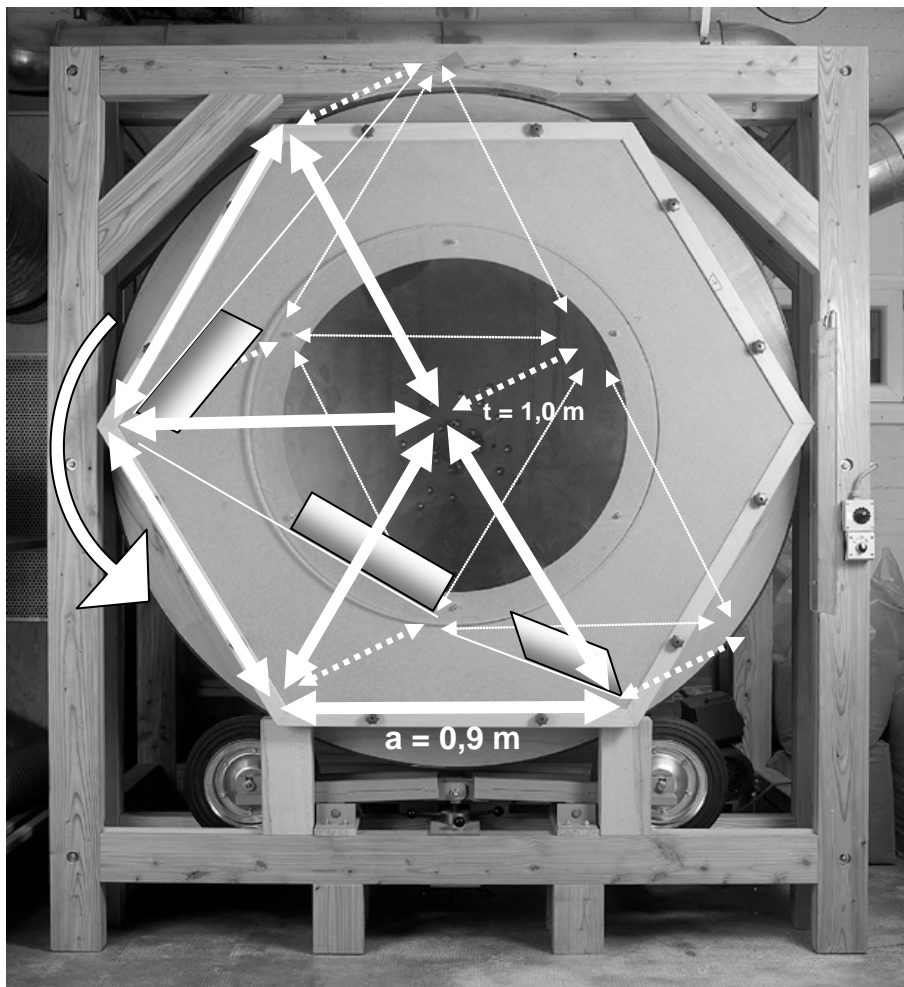


Abbildung 5-10 Mischertrommel mit Mischleitblechen (Länge = 50 cm, Höhe = 15 cm)

Die Geometrie der Mischertrommel entspricht der in den Vorversuchen verwendeten Einrichtung, das Volumen ist jedoch größer. Da nicht alle Prüfungen gleiche Materialmengen erfordern, schwankt der Befüllungsgrad der Mischertrommel bei den einzelnen Mischchargen. Weitere Angaben zum Volumen und zur Befüllung der Mischertrommel finden sich in Tabelle 5-10.

Tabelle 5-10 Maße der Mischertrommel und Drehzahl (Hauptversuche)

Trommelmaße Sechseck:	
Kantenlänge a [m]:	0,9
Tiefe t [m]:	1,0
Mischervolumen V [m <sup>3</sup> ]:	2,15
Befüllgrad [%]:	10 - 15
Trommeldrehzahl [1/min]:	18
Mischerlaufzeit [s]:	180

Für alle Mischungen in den Hauptversuchen wurde einheitlich eine Umdrehungszahl von  $U = 18$  U/min eingestellt. Im Vergleich zu den Vorversuchen mit der kleineren Mischertrommel ( $U = 21$  U/min) sind hier nun je Minute weniger Eingriffe der Mischwerkzeuge je Mischvorgang zu verzeichnen. Durch die Wahl einer Mischerlaufzeit von 180 s sind mit der gewählten Einstellung so viele Mischwerkzeugeingriffe wie nach 154 s Mischerlaufzeit mit der höheren Drehzahl zu erzielen, was unter der Berücksichtigung der Beobachtung einer weitgehend optimalen Mischgüte nach 120 s Mischerlaufzeit der kleineren Trommel ausreichend erscheint. Zudem ist bei dieser niedrigeren

Drehzahl die Differenz zwischen der Bahngeschwindigkeit  $v_{\text{KleineTrom.}}(21 \text{ U/min}) = 1,32 \text{ m/s}$  und  $v_{\text{GroßeTrom.}}(18 \text{ U/min}) = 1,70 \text{ m/s}$  geringer.

### 5.2.1 Untersuchte Mischungsverhältnisse

Im vorangegangenen Materialscreening wurde lediglich ein Mischungsverhältnis von FES zu Kompositpartner untersucht. Die theoretischen Überlegungen, die zur Festlegung der Massenanteile führen, sind dabei in 5.1.3 dargestellt. Durch die materialspezifische Festlegung der Mischungsverhältnisse soll die Matrix an zu untersuchenden Mischungsverhältnissen sinnvoll gewählt werden.

Die in 5.1.3 dargestellten und untersuchten Mischungsverhältnisse liegen bei den Materialkombinationen, die in den weiterführenden Untersuchungen näher betrachtet werden, zwischen aufgerundet 25 % (Hobelspäne) und 35 % (Altpapierflocken). Im Weiteren bleibt festzustellen, dass die volumenstabile Dichte des Anteils A in der Mischung durchgehend überschätzt wurde; d. h. die realen Werte fielen niedriger aus. Bleibt die Zielformulierung der Stabilisierung einer beliebigen Dichtestufe des Kompositpartners B bestehen, so kann diese Forderung also auch mit einer reduzierten Menge an FES erreicht werden. Zu untersuchen bleibt demnach die Auswirkung einer Minimierung der Menge an FES zur Sicherstellung der Volumenstabilität im Verbund. Die Wärmeleitfähigkeiten werden dann, wie bei den bereits untersuchten Mischungen, in erster Linie vom Kompositpartner B bestimmt. Folgt man der vorgestellten Optimierungslogik, so liegen die zu untersuchenden Massenanteile des FES also bei  $\leq 25\% - 35\%$ , bezogen auf den Anteil an FES an der Gesamtmasse.

Die Festlegung der Massenanteile erfolgt wieder über die Modellvorstellung einer Matrix an FES (Komponente A), die über ihre Einbringdichte in  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  definiert ist und deren interpartikuläre Hohlräume vom Kompositpartner B gefüllt werden. Neben der volumenstabilen Dichte des Einzelmaterials von  $25 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (Ansatz C) soll entsprechend der diskutierten Zusammenhänge im Rahmen des Material- und Methodenscreenings auch eine Einbringdichte des FES bei  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  untersucht werden (Ansatz B). Im Weiteren soll geklärt werden, was passiert, wenn die Matrixstruktur der Komponente FES aufgelöst wird. Dies tritt ein, wenn beispielsweise durch Entmischungsvorgänge oder fehlerhafte Mischungsprozesse eine Dichte des FES eingebracht wird, die unter der Streudichte des Materials liegt. Eine Reduzierung der Dichte des FES im Gemisch auf  $8 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  führt damit zum Mischungsverhältnis Ansatz A.

Ein weiterer Ansatz zur Festlegung der Mischungsverhältnisse wird folgendermaßen formuliert. Bei höheren Einbringdichten des FES ( $> 25 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ) ist die Volumenstabilität unkritisch. Das untersuchte FES H01 entwickelt bei höheren Dichten selbst einen Optimalbereich der Wärmeleitfähigkeit (siehe Punkt 5.1.4), der aber im Rahmen des Materialscreenings nicht ausgelotet wurde. Für das in den Hauptversuchen vorliegende FES beginnt der Dichtebereich optimaler Wärmeleitfähigkeit ab ca.  $62 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ . Wird das hierbei verbleibende Hohlraumvolumen nun mit dem Kompositpartner gefüllt, könnte sich eine weitere Optimierung der Wärmeleitfähigkeit zeigen. Das bei  $62 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  verbleibende Hohlraumvolumen soll in dieser Optimierungslogik mit der Streudichte des Kompositpartners B gefüllt werden, was zum Mischungsansatz D führt.

Der Massenanteil des Materials A (FES) zu B (Kompositpartner) verteilt sich für die zweikomponentigen Mischungen demnach materialspezifisch zwischen 9 % - 56 % und 14 % - 75 %.

Neben den 2-komponentigen Mischungen A – D werden auch 3-komponentige Mischungen hergestellt und untersucht. Die Logik zur Herleitung der Mischungsverhältnisse folgt im Prinzip dem Vorgehen bei den 2-komponentigen Materialvarianten. Ausgehend von einer Dichte des FES H01 mit  $15 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  wird das verbleibende Volumen mit dem Material Fichte Hobelspan H02 mit der

Streudichte von  $57 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  aufgefüllt. Das hierbei verbleibende Restvolumen soll schließlich entweder vom Material Faserstoff H08 oder Altpapierflocken H09 jeweils in der Einbringdichte der optimalen Wärmeleitfähigkeit aufgefüllt werden (Mischungsvarianten E08 und E09). Bei der Mischungsvariante F08 wurde der Faserstoffanteil auf ca. 30 % erhöht und die Massenanteile der Komponenten H01 und H02 entsprechend kleiner gewählt.

Alle untersuchten 2- und 3-komponentigen Mischungsverhältnisse sind in einer herausklappbaren Tabelle in Anhang 13 beschrieben. Hier finden sich auch die zugeordneten Mischungskennziffern.

### 5.2.2 Mischgütebestimmung

Die Qualität der Mischung und die Bewertung des Mischprozesses sollen im Folgenden anhand zweier Kriterien beurteilt werden. Es soll einerseits festgestellt werden, wie gut die gemessene Konzentration des FES ( $\bar{c}_K$ ) in der Probe mit der angestrebten Konzentration in der Grundgesamtheit ( $c_{Gg}$ ) übereinstimmt und wie stark die Streuung der gemessenen Konzentration um den Mittelwert der gemessenen Konzentrationen ( $s_k^2$ ) ausfällt. Die Mischgütebestimmung wurde entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.5 durchgeführt.

In Tabelle 5-11 sind die nach Beendigung einer einheitlichen Mischzeit von 180 s durchgeführten Mischgütebestimmungen zusammengefasst. Die Proben hierfür wurden direkt nach dem Stillstand der Mischertrommel entnommen und lassen daher keine Aussage über die Stabilität der Mischung zu.

Mit Ausnahme der Mischungen C02 und D02 sind die Abweichungen der gemessenen mittleren Konzentration des FES ( $\bar{c}_K$ ) von der Konzentration in der Grundgesamtheit ( $c_{Gg}$ ) verhältnismäßig gering. Durchgehend auf niedrigem Niveau sind die Werte der geschätzten empirischen Streuung  $s_k^2$ . Dies spricht für die Reproduzierbarkeit des Mischprozesses.

Tabelle 5-11 Mischgütebestimmung unterschiedlicher Mischungen direkt nach dem Mischprozess

	$\bar{c}_K$	$c_{Gg}$	$\bar{c}_K - c_{Gg}$	$s_k^2$	$n_{\text{Ges}}$	gepr. Chargen
A02	11,1 %	9,2 %	1,9 %	0,06 %	8	1
B02	19,2 %	16,1 %	3,1 %	0,17 %	3	1
C02	32,7 %	24,8 %	7,9 %	0,94 %	8	1
D02	77,5 %	56,3 %	21,2 %	0,90 %	8	1
A08	15,4 %	13,6 %	1,8 %	0,11 %	13	2
B08	24,7 %	23,1 %	1,6 %	0,05 %	14	2
C08	34,7 %	33,9 %	0,8 %	0,17 %	17	3
D08	75,3 %	74,6 %	0,7 %	0,60 %	24	3
A09	12,3 %	13,3 %	-1,0 %	0,04 %	24	3
B09	22,8 %	22,7 %	0,1 %	0,04 %	14	2
C09	32,7 %	33,5 %	-0,8 %	0,09 %	32	4
D09	63,0 %	65,9 %	-2,9 %	0,27 %	24	3
E08	23,0 %	19,0 %	4,0 %	0,38 %	16	2
F08	15,9 %	15,4 %	0,5 %	0,03 %	14	2
E09	21,0 %	19,0 %	2,0 %	0,13 %	8	1

Im Weiteren wurde für die Mischungen nach Ansatz B für eine Mischercharge auch der Verlauf der Mischgüte nach unterschiedlichen Mischerlaufzeiten geprüft. Tabelle 5-12 zeigt die Ergebnisse der Messung nach 60 s, 120 s und 180 s für die Mischungen B02, B08 und B09.

Tabelle 5-12 Mischgütebestimmung über der Mischerlaufzeit nach 60 s, 120 s und 180 s

	Mischzeit [s]	$\bar{c}_K$	$c_{Gg}$	$\bar{c}_K - c_{Gg}$	$s_K^2$	$n_{Ges}$	gepr. Chargen
B02	60	34,6 %	16,1 %	18,5 %	6,46 %	6	1
	120	20,7 %	16,1 %	4,6 %	0,79 %	6	1
	180	19,2 %	16,1 %	3,1 %	0,32 %	6	1
B08	60	24,0 %	23,1 %	0,9 %	0,11 %	6	1
	120	26,4 %	23,1 %	3,3 %	0,21 %	6	1
	180	25,6 %	23,1 %	2,5 %	0,13 %	6	1
B09	60	23,4 %	22,7 %	0,7 %	0,05 %	6	1
	120	21,8 %	22,7 %	-0,9 %	0,02 %	6	1
	180	22,9 %	22,7 %	0,2 %	0,03 %	6	1

Eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Mischerlaufzeit zeigt bei den gewählten Zeiten nur die Mischung B02. Die Mischungen mit Faserstoff H08 und Altpapierflocken H09 erreichen bereits nach 60 s Mischerlaufzeit ein Niveau der Mischgüte, das sich nicht von den Werten nach 180 s unterscheidet.

### 5.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit der in den Hauptversuchen verwendeten Materialien H01, H02, H08 und H09 sowie aller 2- und 3-komponentigen Mischungen wurde, ausgehend von einer Einbringdichte nahe der Streudichte, in unterschiedlichen Dichtestufen, wie in 4.2.1.5 beschrieben, bestimmt. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsprüfungen der Einzelmaterialien und der 2- und 3-komponentigen Mischungen bei unterschiedlichen Einbringdichten sind in Anhang 4 dargestellt. Im Folgenden sollen zunächst die aus der Wärmeleitfähigkeit über der Einbringdichte bestimmten Regressionspolynome (Tabelle 5-13) für die Einzelmaterialien diskutiert werden.

Tabelle 5-13 Regressionsparameter für den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte

RGP	$\lambda(\rho) = a_2 \cdot \rho^2 + a_1 \cdot \rho + a_0$			$R^2$
	$a_2$	$a_1$	$a_0$	
WLF H01	4,4587E-06	-6,6496E-04	6,5822E-02	0,97
WLF H02	2,9746E-06	-5,0525E-04	6,6939E-02	0,88
WLF H08	2,4570E-06	-2,6155E-04	4,3348E-02	0,53
WLF H09	1,5886E-06	-1,6519E-04	4,3662E-02	0,88
WLF A02	9,0558E-07	-1,8818E-04	5,3098E-02	0,97
WLF B02	1,0056E-06	-2,1230E-04	5,3382E-02	1,00
WLF C02	3,2798E-06	-5,7664E-04	6,7779E-02	0,98
WLF D02	3,3527E-06	-5,3912E-04	6,3415E-02	0,98
WLF A08	1,9061E-06	-2,5132E-04	4,4311E-02	0,83
WLF B08	3,5591E-06	-4,9148E-04	5,2972E-02	1,00
WLF C08	3,1905E-06	-4,0265E-04	4,9902E-02	0,89
WLF D08	5,1622E-06	-7,0092E-04	6,2192E-02	0,95
WLF E08	2,8348E-06	-4,6237E-04	6,0061E-02	0,95
WLF F08	1,9705E-06	-3,1899E-04	5,1959E-02	0,92
WLF A09	4,0564E-06	-4,6830E-04	5,2919E-02	0,84
WLF B09	3,2313E-06	-3,9495E-04	5,2002E-02	0,90
WLF C09	3,1140E-06	-3,8929E-04	5,2318E-02	0,92
WLF D09	4,7673E-06	-6,3414E-04	6,1132E-02	0,96
WLF E09	2,4888E-06	-4,2450E-04	5,9305E-02	0,98

Der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte innerhalb einer Materialvariante ist in den meisten Fällen durch ein sehr gut bestimmtes Polynom 2. Grades zu beschreiben. In der Regel existiert ein bei Spanmaterialien mehr, bei Faserstoffen weniger stark ausgeprägter Optimalbereich. Bei dem Material FES H01 wird dieser Optimalbereich durch das gewählte Regressionsmodell jedoch nicht exakt abgebildet. Die Wärmeleitfähigkeit strebt hier ab ca.  $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  asymptotisch dem Minimum entgegen. Der Dichtebereich steigender Wärmeleitfähigkeit kann nicht erfasst werden, da die Rückstellkräfte der komprimierten Probe ab ca.  $90 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  so groß werden, dass die Schließkraft der oberen Heizplatte des Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes den Kontakt zur Probenoberfläche nicht mehr halten kann.

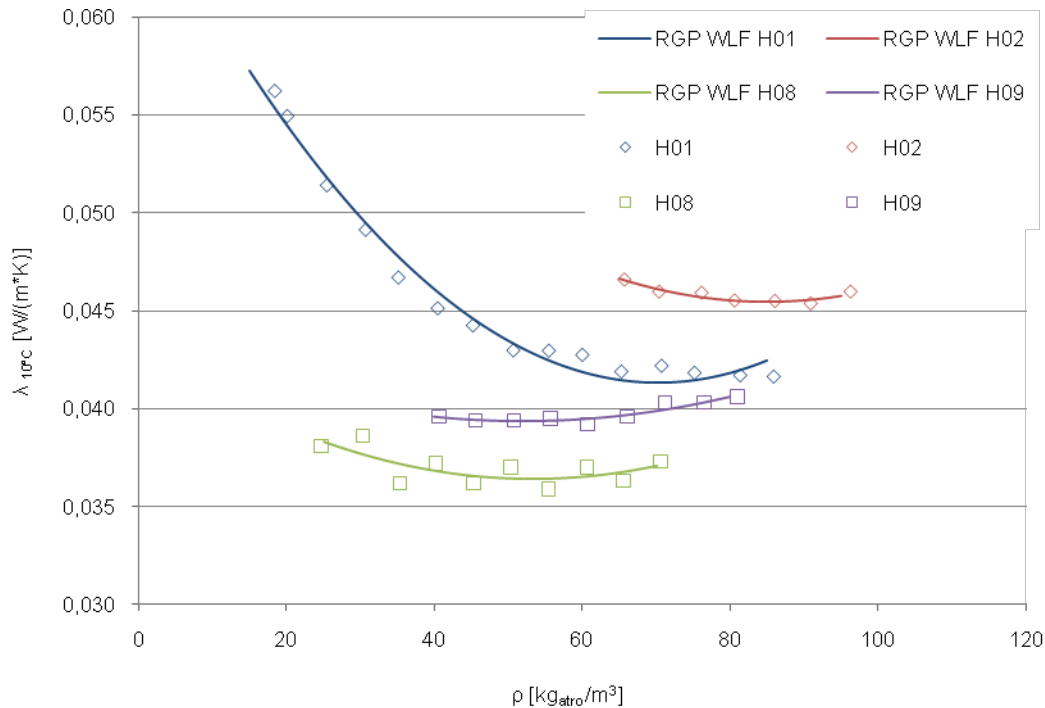


Abbildung 5-11  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  der Einzelmaterialien und zugehörige Regressionspolynome  $\lambda_{10^\circ\text{C}}(\rho)$  entsprechend Tabelle 5-13

Interessant ist, dass die Wärmeleitfähigkeit der Altpapierflocken H09 bei höheren Dichten steigt und in einem Dichtebereich ab ca.  $80 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  in den Bereich der Wärmeleitfähigkeit des FES hineinläuft. Ansonsten besteht zwischen den Materialien bezüglich der Wärmeleitfähigkeit eine deutliche Differenzierung. Der Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit ist bei dem sehr voluminösen, flächigen FES H01 im Dichtebereich zwischen der Streudichte des Materials und ca.  $60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  am deutlichsten zu beobachten. In diesem Bereich lassen sich im Partikelgefüge ausgeprägte makroskopische Hohlraumstrukturen erkennen. Es existiert praktisch keine gegeneinander abgeschlossene Porenstruktur, weshalb zu vermuten steht, dass in diesem Rohdichtebereich der Einfluss der Konvektion auf die Wärmeübertragung groß ist. Mit steigender Verdichtung wird die Porenstruktur gegeneinander abgedichtet. Der Einfluss der Konvektion wird geringer und die Ausbildung von Wärmebrücken durch Span-Span-Kontakte sowie der Einfluss der Strahlung überwiegen. Der Wärmetransport durch das Material hindurch erreicht wie beschrieben ab ca.  $60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  ein Minimum, das aufgrund des beschränkten Anpressdruckes der Heizplatten des Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes in Richtung höherer Einbringdichten nicht definitiv ausgelotet werden kann. Im Vergleich mit den Fichte Hobelspänen H02 lässt sich aber konstatieren, dass bei vergleichbarer Einbringdichte durch die flächige Geometrie des FES offenbar eine bezüglich der

Wärmeleitfähigkeit günstigere Hohlraumstruktur erzeugt wird. Auch ein Bezug auf den Verdichtungsfaktor eliminiert hier die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit nicht.

Soll bei den 2-komponentigen Mischungen aus FES H01 und einem Kompositpartner neben der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Einbringdichte auch der Einfluss des Mischungsverhältnis dargestellt werden, so bietet es sich an, aus den Wertetripeln (MV [%],  $\rho$  [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ],  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]) mit Hilfe einer 3D-Flächenapproximation einen funktionalen Zusammenhang abzuleiten. Der Ansatz der zu Grunde liegenden Funktion  $\lambda = f(\text{MV}, \rho)$  entspricht folgender Gleichung 4 mit  $x = \text{MV}$ ,  $y = \rho$  und  $z = \lambda$ .

$$z = f(x,y) = a_1 + a_2 * x + a_3 * x^2 + a_4 * x^3 + a_5 * y + a_6 * y^2 + a_7 * y^3 \quad [4]$$

Die Koeffizienten  $a_1 - a_7$  für die untersuchten Varianten H09, A09, C09, D09 und H01 sind in Tabelle 5-14 dargestellt.

Tabelle 5-14 Koeffizienten zu den Flächenapproximationen aus Abbildung 5-12, Abbildung 5-14 und Abbildung 5-16

$\lambda_{10^\circ\text{C}} = f(\text{MV}, \rho) = a_1 + a_2 * \text{MV} + a_3 * \text{MV}^2 + a_4 * \text{MV}^3 + a_5 * \rho + a_6 * \rho^2 + a_7 * \rho^3$				
Kompositpartner	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
H02	7,3867E-02	-1,7200E-04	2,7450E-06	-1,4740E-08
H08	6,9385E-02	4,9000E-05	-1,3890E-07	4,8410E-09
H09	7,7023E-02	2,5000E-05	-2,5390E-07	3,7090E-09
	$a_5$	$a_6$	$a_7$	
H02	-9,2100E-04	1,0000E-05	-3,6460E-08	
H08	-1,7300E-03	2,9000E-05	-1,6480E-07	
H09	-1,8380E-03	2,9000E-05	-1,5340E-07	

Da eine optische Interpretation von Flächendarstellungen schwierig ist, sind in Abbildung 5-12, Abbildung 5-14 und Abbildung 5-16 jeweils Isolinien im Abstand von 0,001  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  eingezeichnet. Betrachtet man diese 3-dimensionale Darstellung nun von oben (Abbildung 5-13, Abbildung 5-15 und Abbildung 5-17), so lässt die entstandene Graphik durch die Lage der Isolinien zueinander einen Eindruck von der Verteilung der Wärmeleitfähigkeit in der Achsenbeziehung von Dichte und Mischungsverhältnis zu. Hierdurch lassen sich Optimalbereiche zwischen Mischungsverhältnis und Einbringdichte erkennen. Der Abstand der Isolinien zueinander ermöglicht darüber hinaus auch eine Aussage über die Gradienten in der Fläche, woraus die Empfindlichkeit der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Mischungsverhältnis und der Einbringdichte abgeschätzt werden kann.

Da die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit auch in Mischung nur für die untersuchten Partikelkollektive der Einzelmaterialien gelten, ist die Darstellung des relativen Einflusses der Mischung auf den prinzipiellen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Mischungsverhältnis und Einbringdichte interessanter als die absoluten Werte, die durch die Regressionspolynome nach Tabelle 5-13 besser abgebildet werden als in der approximierten Fläche.

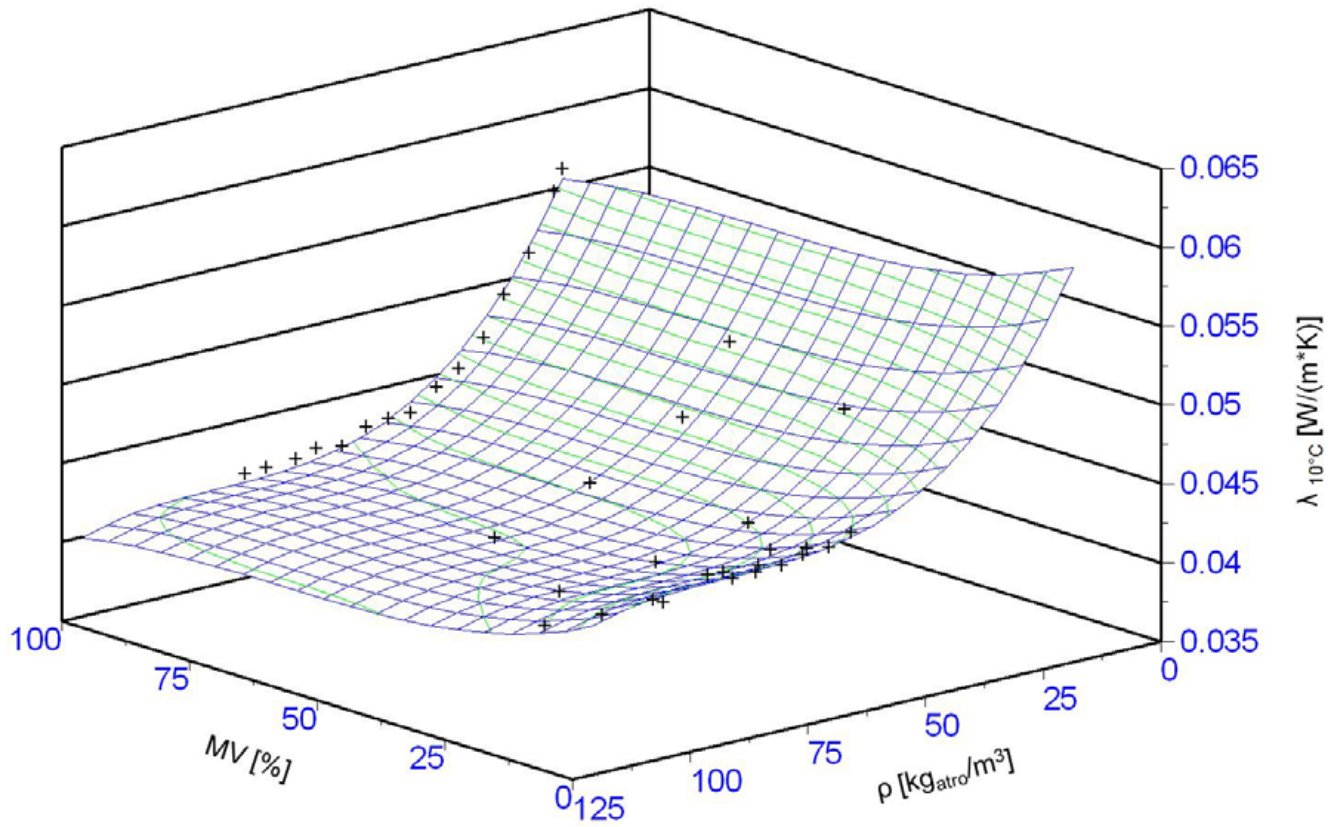


Abbildung 5-12  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Fichte Hobelspan H02

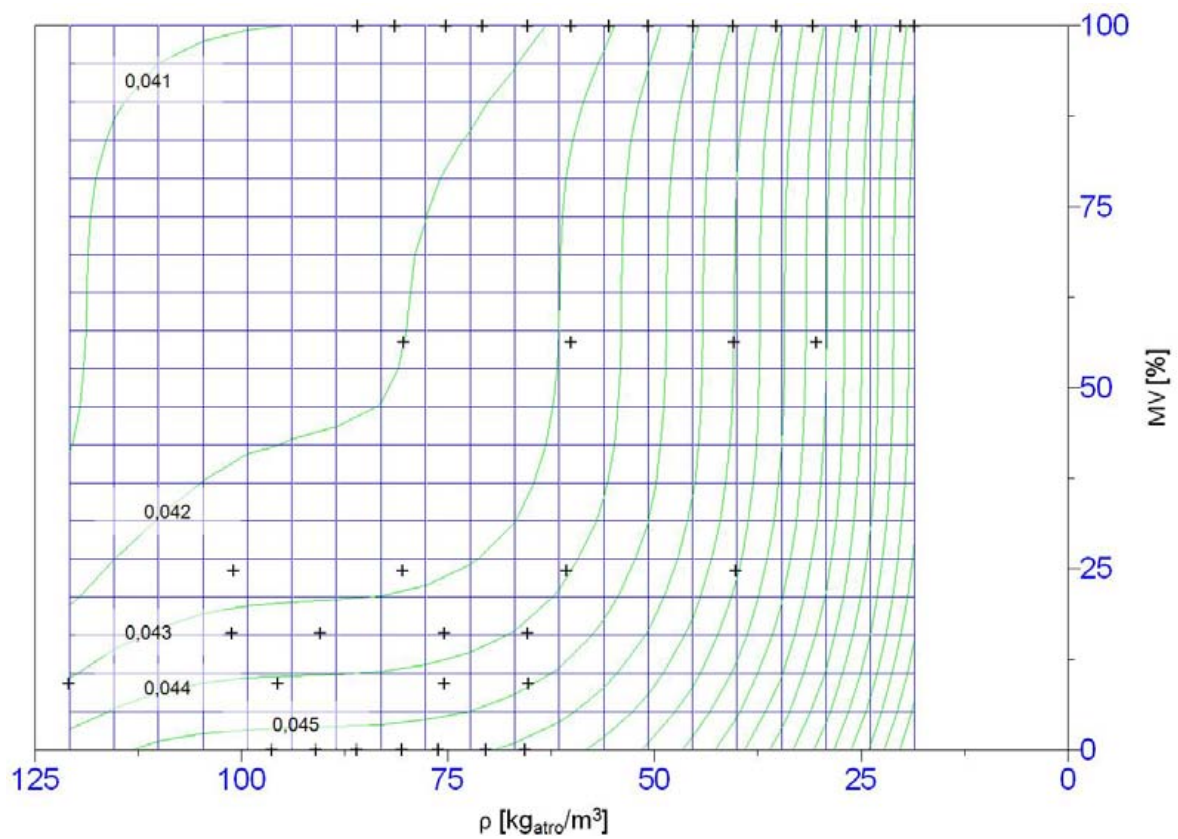


Abbildung 5-13 Isolinien aus  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (MV; $\rho$ ) für die Mischungen mit Fichte Hobelspan H02 projiziert auf die Ebene [ $\rho$ ;MV]

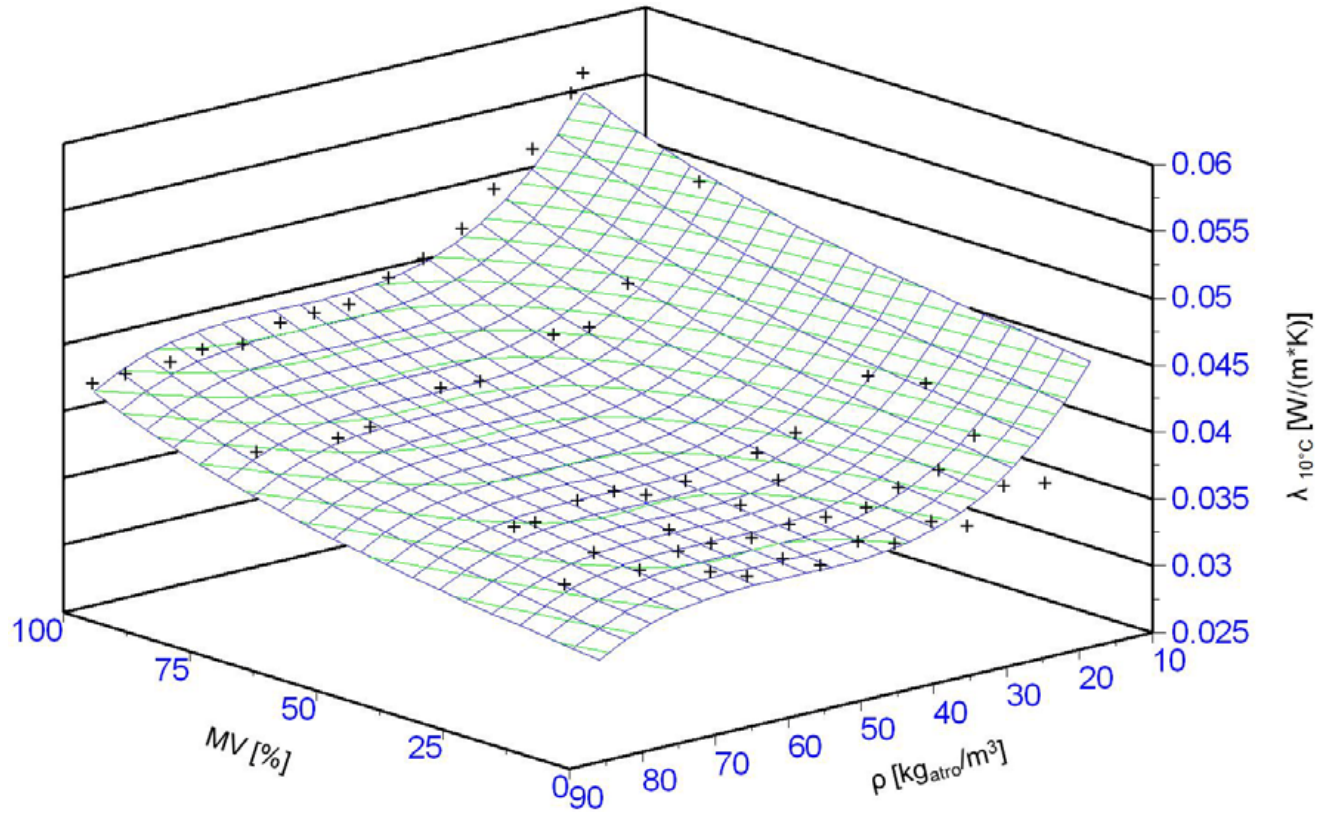


Abbildung 5-14  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Faserstoff H08

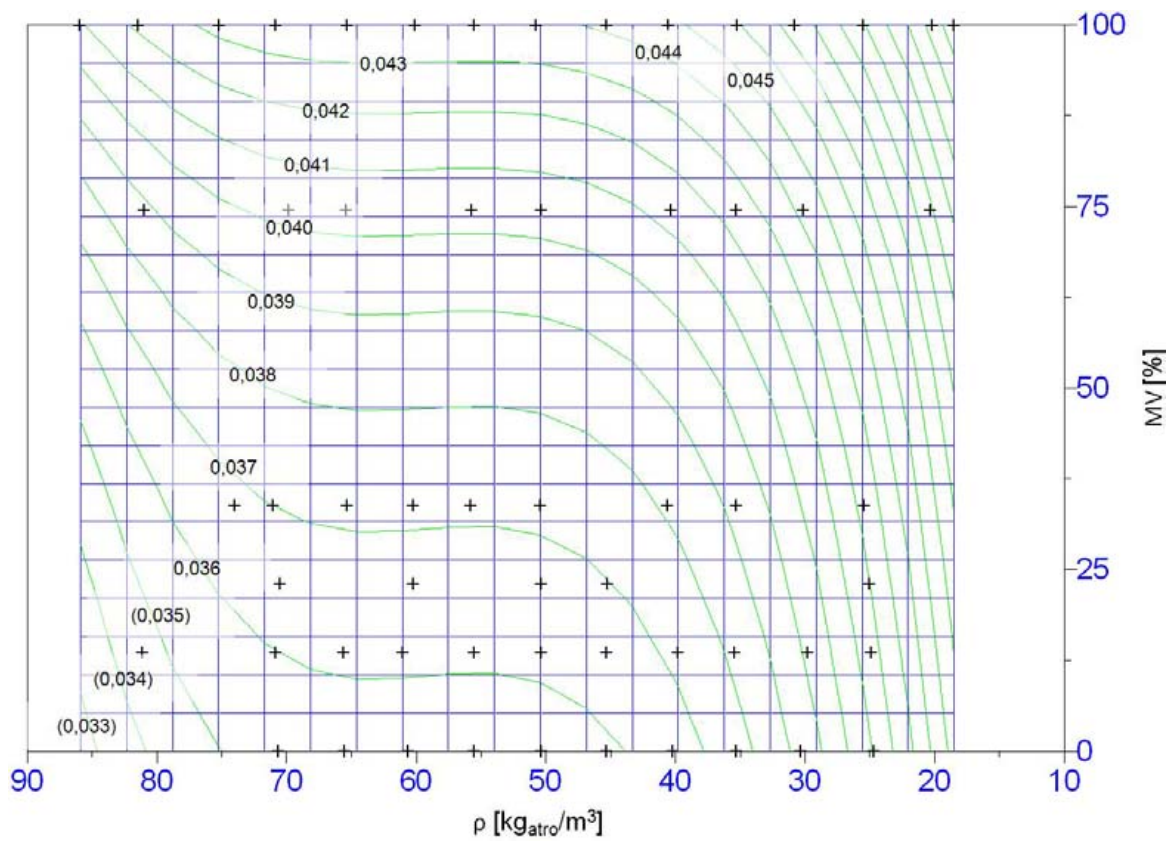


Abbildung 5-15 Isolinien aus  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (MV; $\rho$ ) für die Mischungen mit Faserstoff H08 projiziert auf die Ebene [ $\rho$ ;MV]



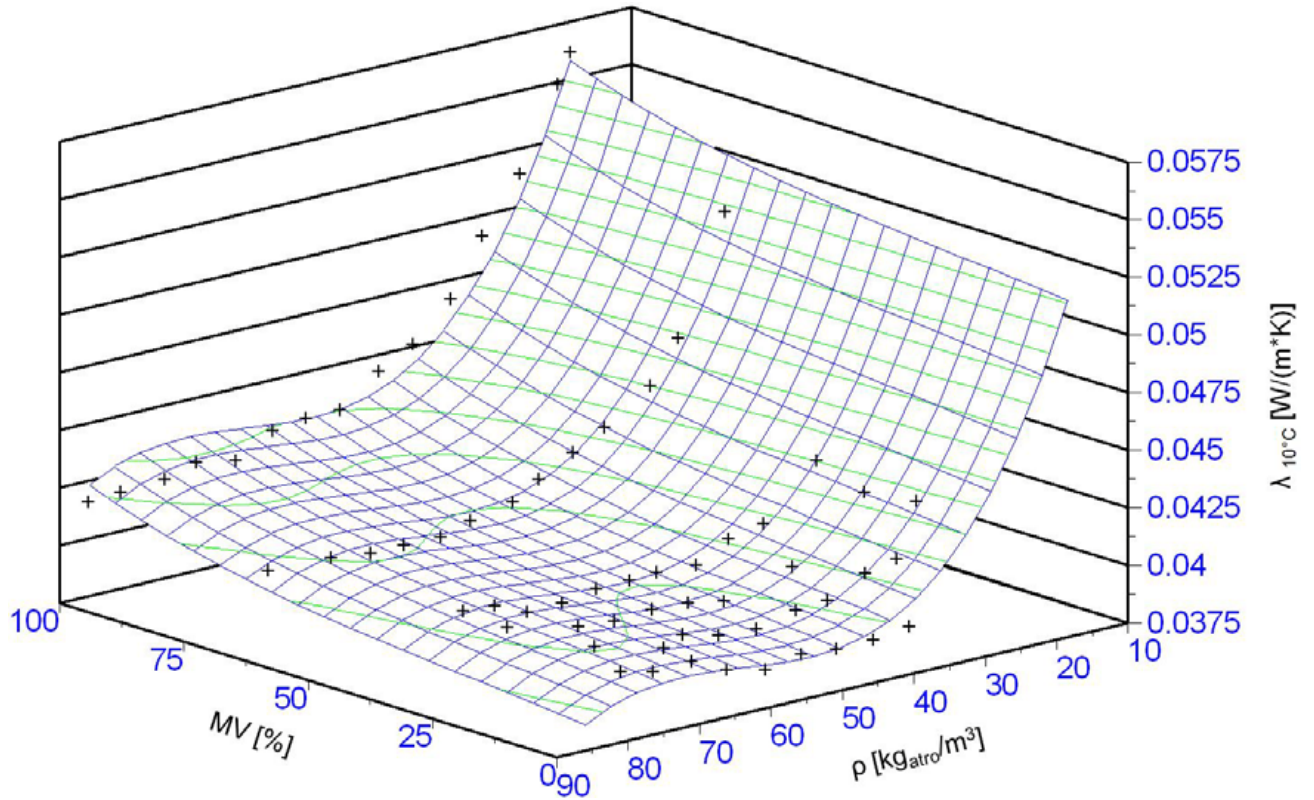


Abbildung 5-16  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  (MV; $\rho$ ) für Mischungen mit Altpapierflocken H09

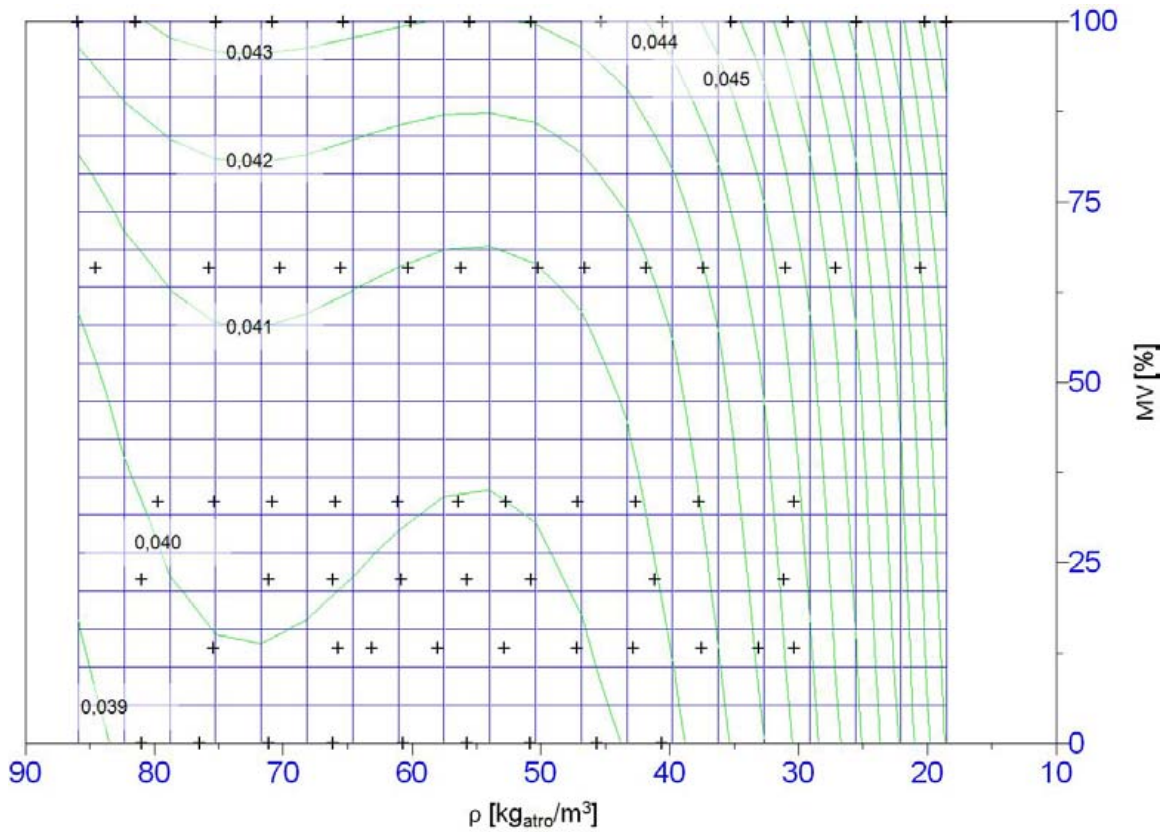


Abbildung 5-17 Isolinien aus  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  [W/m·K] (MV [%];  $\rho$  [kgₐₜᵣₒ/m³]) für die Mischungen mit Altpapierflocken H09 projiziert auf die Ebene [ρ;MV]

Bei den Mischungen mit Fichte Hobelspänen (Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13) ist vorderhand zu beachten, dass in dem von beiden Spänen gemeinsam erreichbaren Dichtebereich die Wärmeleitfähigkeit des FES schlechter ist als die der Fichte Hobelspäne. Demzufolge liegt das Minimum der Funktion im Bereich hoher Dichten des FES als Einzelmaterial. Im Bereich bis ca.  $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  verlaufen die Isolinien in Abbildung 5-13 annähernd parallel zur Ordinate. Ein geringer Einfluss der Fichte Hobelspäne auf die Wärmeleitfähigkeit ist zwar im Mischungsbereich  $< 25 \%$  zu beobachten, in diesem Dichtebereich ist die Funktion allerdings nicht durch Messwerte unterstützt. Mit steigender Dichte lässt sich über die Mischungsverhältnisse hinweg ein zunehmender Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die Wärmeleitfähigkeit beobachten, der ab ca.  $75 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  deutlich ausgeprägt ist, aber ebenfalls ab ca.  $25 \%$  -  $50 \%$  Anteil an FES relativ flach auf das Minimum im Bereich hoher Dichten des FES als Einzelmaterial ausläuft.

Die Mischungen mit Faserstoff (Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15) zeigen aufgrund der größeren Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien auch einen ausgeprägteren Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die Wärmeleitfähigkeit daraus hergestellter Materialvarianten. Die in Klammern gesetzten Werte der Isolinien aus Abbildung 5-15 sind niedriger als die entsprechenden Werte des Faserstoffs H08 als Einzelmaterial und resultieren aus der approximierten Funktion, welche die Werte in diesem Bereich absolut zu niedrig verlaufen lässt. Zunächst fällt auf, dass im Dichtebereich zwischen ca.  $45 - 75 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  die Isolinien praktisch parallel zur Abszisse verlaufen, der Einfluss des Mischungsverhältnisses ist in diesem Bereich also relativ unabhängig von der Einbringdichte. Der Verlauf der partiellen Funktion  $\lambda_{10^\circ\text{C}} [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$  (MV [%];  $\rho = \text{konst.} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$ ) ist für  $\rho = 60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  in Abbildung 5-18 dargestellt. Hier lässt sich erkennen, dass bis ca.  $50 \%$  FES ein annähernd linearer Zusammenhang vorliegt, bei höheren Anteilen an FES ist der Einfluss überproportional. Im Dichtebereich  $< 45 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  und mit niedrigeren Anteilen an FES gewinnt der Einfluss der Dichte an Bedeutung. Umgekehrt steigt mit höheren Anteilen an FES ( $> 50 \%$ ) tendenziell der Einfluss des Mischungsverhältnisses.

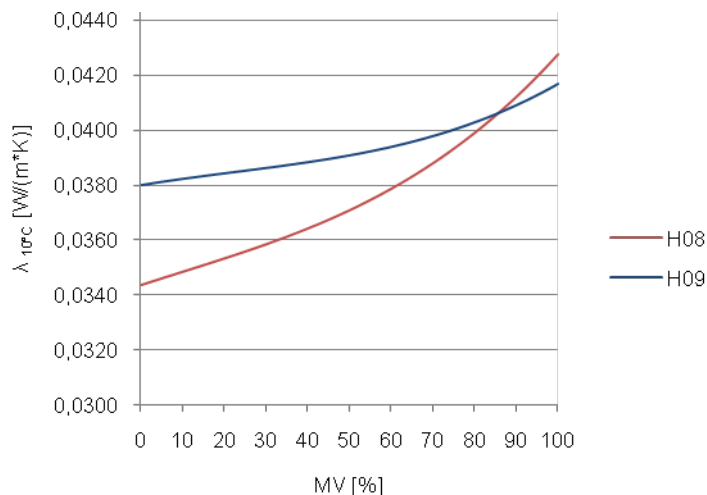


Abbildung 5-18  $\lambda_{10^\circ\text{C}} (\text{MV}; \rho = \text{konst.})$  für  $\rho = 60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ; Mischungen: H01 und H08; H01 und H09

Für die Mischungen zwischen FES H01 und Altpapierflocken H09 (Abbildung 5-16 und Abbildung 5-17) lässt sich feststellen, dass der prinzipielle Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Einbringdichte und des Mischungsverhältnisses im Wesentlichen den Zusammenhängen bei den Mischungen mit Faserstoff entspricht. Auch hier wird ab ca.  $40 - 45 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  die Wärmeleitfähigkeit eher vom Mischungsverhältnis als von der Einbringdichte bestimmt. Der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Anteil an FES ist hier aufgrund der geringeren Unterschiede in den Wärmeleitfähigkeiten der Einzelmaterialien aber insgesamt flacher als bei den Mischungen mit

Faserstoff (Abbildung 5-18). Weiter lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Funktion  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  [W/(m\*K)] (MV [%];  $\rho = \text{konst. [kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$ ) für  $\rho = 60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  bis ca. 70 % Anteil an FES annähernd linear verläuft und damit später als bei den Mischungen mit Faserstoff überproportional ansteigt.

Die Wärmeleitfähigkeit der 3-komponentigen Mischungen E08, F08 und E09 ist in der Gegenüberstellung zu den Werten der verwendeten Einzelmaterialien in Abbildung 5-19 dargestellt. Die Mischungen E08 und E09 unterscheiden sich im Niveau der Wärmeleitfähigkeit über der Dichte nicht. Die Abhängigkeit von der Einbringdichte entspricht in etwa dem Material FES H01. Die Mischung F08 verläuft auf einem insgesamt niedrigeren Niveau, die Abhängigkeit von der Einbringdichte bewegt sich hier in etwa zwischen der, der verwendeten Einzelmaterialien.

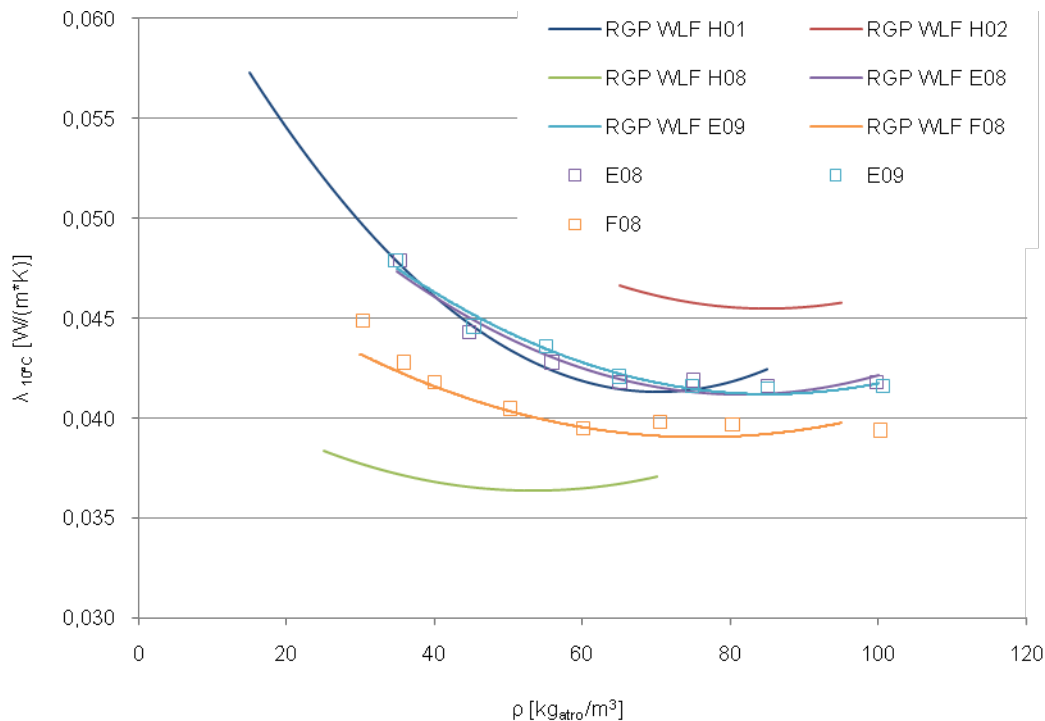


Abbildung 5-19  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  der dreikomponentigen Mischungen und Regressionspolynome  $\lambda_{10^\circ\text{C}}(\rho)$  der Einzelmaterialien und dreikomponentiger Mischungen

#### 5.2.4 Temperaturverhalten der Dämmschicht

Bei insgesamt vier Materialvarianten wurden weiterführende Versuche zum Temperaturverhalten der Dämmschicht in einer praxisrelevanten Einbausituation vorgenommen. Die Versuche wurden entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.6 durchgeführt. Geprüft wurden die Materialvarianten Altpapierflocken H09 sowie die Mischungen A09, C09 und D09. Die gewählten Dichtestufen waren 40, 50, 60 und 70  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ . Alle Materialvarianten wurden mit der gleichen Einbringdichte, jeweils in einem Durchgang und nebeneinander eingebaut, geprüft. Insgesamt wurden also vier Versuchsdurchgänge durchgeführt.

Nach Beendigung einer Versuchsreihe stehen umfangreiche Datensätze zur Verfügung, die den Temperaturverlauf einer Variante in jeweils neun gemessenen Schichten darstellen. Im Anhang 5 ist für alle geprüften Materialvarianten in der Dichtestufe 40 und 70  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  der Temperaturverlauf über der Versuchslaufzeit abgebildet. Die anderen Dichtestufen liegen qualitativ dazwischen. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse graphisch dargestellt. In Abbildung 5-20 ist exemplarisch das Temperaturverhalten der Materialvariante C09 bei 40  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  und 70  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  abgebildet.

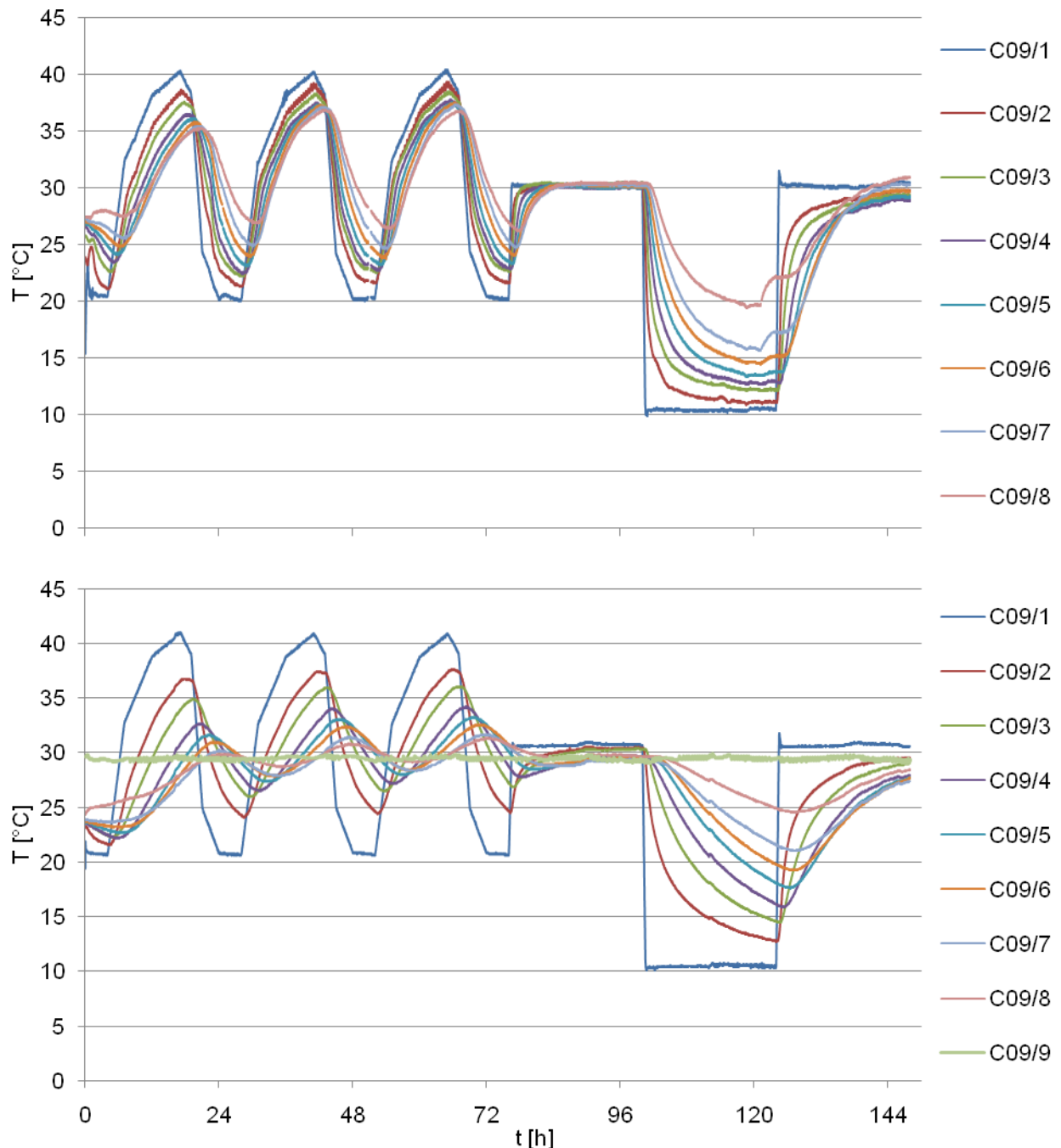


Abbildung 5-20 Temperaturverhalten der Dämmschicht; Materialvariante C09; Einbringdichte:  $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (oben) und  $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (unten)

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei höherer Einbringdichte sowohl der Abstand der maximalen Amplituden zueinander als auch der zeitliche Versatz der lokalen Maximalwerte größer wird. Dieser Effekt lässt sich bei allen geprüften Materialvarianten beobachten (Anhang 5). Um den Einfluss des Mischungsverhältnisses auf das Temperaturverhalten bei unterschiedlicher Einbringdichte abzubilden, sind im Folgenden für die Materialvarianten H09 (Einzelmaterial) und D09 die jeweils erste Messebene (klimaschrankseitig = anregende Temperaturkurve) und achte Messebene (trockenschrankseitig = die letzte Messebene im Material) bei  $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  und  $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  gegenübergestellt (Abbildung 5-21).

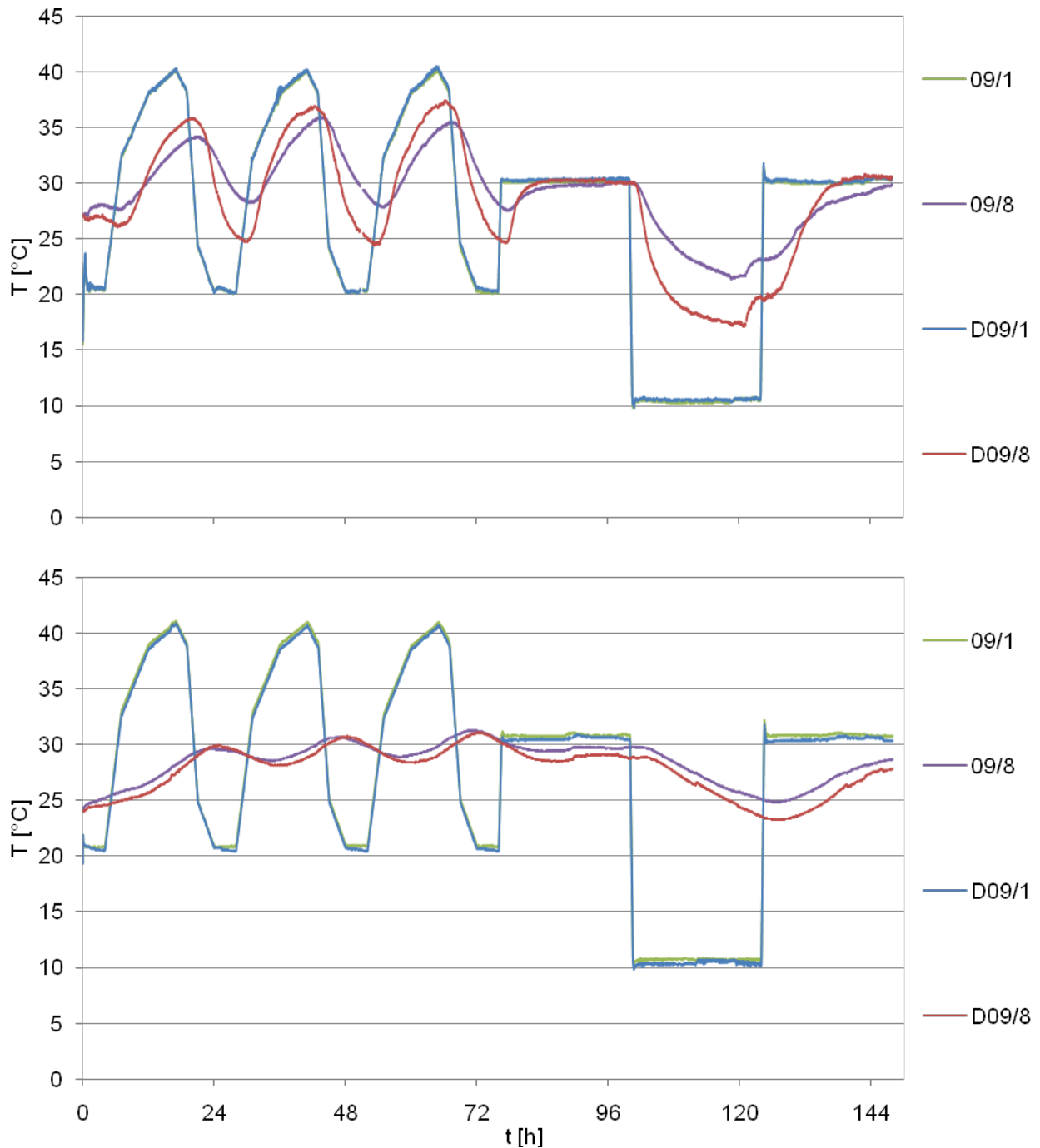


Abbildung 5-21 Temperaturverhalten: Messebene \*\*/1 und \*\*/8 der Materialvarianten H09 und D09; Oben:  $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  Unten:  $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$

Bei einer Einbringdichte von  $40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  zeigen sich bei nahezu identischer Anregung (blaue Kurven) zwischen den Materialvarianten H09 (Einzelmaterial) und D09 (Mischung) deutliche Unterschiede sowohl in der Höhe der lokalen Maxima und Minima der Temperaturkurve als auch in der zeitlichen Verschiebung zwischen anregendem Temperaturverlauf und der Reaktion der letzten Materialsicht. Erhöht man die Dichte auf  $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ , verschwinden diese Unterschiede fast gänzlich.

Für alle geprüften Materialvarianten wurden die über die drei Zyklen gemittelten Differenzen zwischen den lokalen Temperaturmaxima und -minima der achten und ersten Messebene (entsprechend Abbildung 5-22) zueinander ins Verhältnis gesetzt. Der so ermittelte Quotient  $\Delta T_1 / \Delta T_8$  stellt das unter den Randbedingungen entsprechend 4.2.2.6 geltende Temperaturamplitudenverhältnis (TAV [-]) dar.

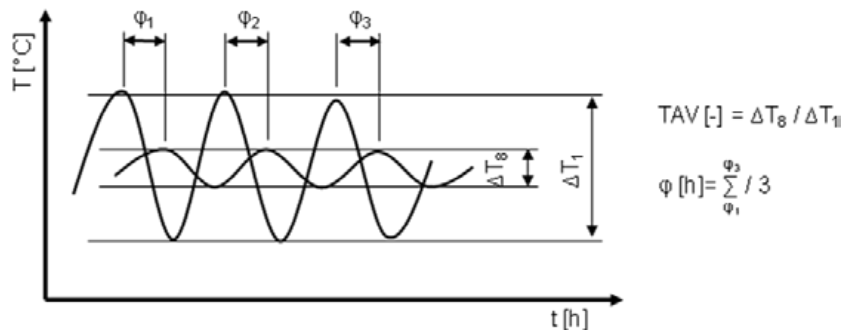


Abbildung 5-22 Definition des Temperaturamplitudenverhältnisses (TAV) und der Phasenverschiebung  $\varphi$

Aus den zeitlichen Abständen der Maximalpeaks zwischen erster und achter Messebene wurde weiter die unter den versuchstechnischen Randbedingungen geltende Phasenverschiebung ( $\varphi$  [h]) gemittelt. Die Minima bleiben bei der Berechnung der Phasenverschiebung unberücksichtigt, da in Abhängigkeit des gewählten Temperaturprofils kein zeitlich eindeutig definierbares Minimum festgestellt werden kann. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-15 dargestellt.

Tabelle 5-15 TAV [-],  $\varphi$  [h] und  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  [W/(m\*K)] in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis [%] und der Einbringdichte

40 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	MV [%]	TAV [-]	$\varphi$ [h]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]
Altpapierflocken H09	0	0,37	02:57	0,040
A09	13,3	0,44	02:18	0,041
C09	33,5	0,49	02:11	0,042
D09	65,9	0,60	01:44	0,043
50 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>				
Altpapierflocken H09	0	0,29	03:20	0,039
A09	13,3	0,30	03:43	0,040
C09	33,5	0,39	03:38	0,041
D09	65,9	0,52	01:57	0,041
60 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>				
Altpapierflocken H09	0	0,18	05:03	0,039
A09	13,3	0,17	05:24	0,039
C09	33,5	0,19	05:47	0,040
D09	65,9	0,32	04:54	0,040
70 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>				
Altpapierflocken H09	0	0,08	05:30	0,040
A09	13,3	0,08	06:11	0,040
C09	33,5	0,08	06:43	0,040
D09	65,9	0,11	06:43	0,040

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Dichte bei allen Materialien das TAV kleiner wird und größere Phasenverschiebungen gemessen werden können. Die absoluten Unterschiede zwischen den Materialvarianten werden mit zunehmender Einbringdichte geringer. Ab 50 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> erreicht die Mischung A09 im Vergleich mit den Altpapierflocken H09 als Einzelmaterial trotz marginal besserer Wärmeleitfähigkeit ein vergleichbares TAV und eine um ca. 12 % größere Phasenverschiebung. Bei 60 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> ist auch die Mischung C09 im Bereich des TAV der Altpapierflocken H09 und erreicht gleichzeitig eine ca. 15 % größere Phasenverschiebung. Ab 70 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> liegt, mit Ausnahme der Mischung D09, bezüglich des TAV bei allen Materialvarianten praktisch das gleiche Niveau vor. Mit

steigendem Anteil an FES in der Mischung nimmt gleichzeitig die Phasenverschiebung deutlich zu. Das Material C09 erreicht hier bei  $70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  eine um ca. 22 % größere Phasenverschiebung als das Einzelmaterial Altpapierflocken H09.

Das instationäre Temperaturverhalten der Dämmschicht wird bestimmt von der Temperaturleitfähigkeit  $a$  und dem Wärmeeindringkoeffizienten  $b$  (3.1.1). Beide Kenngrößen hängen von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Dichte  $\rho$  sowie der spezifischen Wärmekapazität  $c$  des Materials ab. Die spezifische Wärmekapazität ist für Holz und lignocellulosehaltige Materialien von der Dichte und Holzart relativ unabhängig. Da sich aber die spezifische Wärmekapazität von absolut trockenem Holz ( $c_{\text{H}_0}$  ca.  $1356,5 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) und Wasser ( $c_{\text{W}}$  ca.  $4186,8 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) unterscheiden, besteht eine starke Abhängigkeit von der Materialfeuchte  $u$  ( $\text{kg}/\text{kg}$ ) (AUTORENKOLLEKTIV 1990).

$$c_{\text{Hu}} = c_{\text{W}} \cdot \left( \frac{u + (c_{\text{H}_0} / c_{\text{W}})}{u + 1} \right) \quad [5]$$

Aufgrund des unterschiedlichen Sorptionsverhalten von Altpapierflocken und Holzspänen ist die Materialfeuchte vom Mischungsverhältnis abhängig. Die Materialvarianten mit höherem Holzanteil weisen höhere Materialfeuchten auf. In Tabelle 5-16 sind die aus der durchschnittlichen Materialfeuchte nach der Prüfung errechneten spezifischen Wärmekapazitäten und die Temperaturleitzahl sowie der Wärmeeindringkoeffizient abgebildet. Die Materialfeuchte ist während der Prüfung durch das an die Temperaturkurve angepasste Feuchteprofil praktisch sehr geringen Schwankungen unterworfen, sodass die nach Versuchsende gemessene mittlere Materialfeuchte als repräsentativ angesehen werden kann.

Innerhalb einer Stufe gleicher Einbringdichte sind die Unterschiede bezüglich Temperaturleitzahl  $a$  und Wärmeeindringkoeffizient  $b$  zu gering, als dass die deutlichen Unterschiede in der Phasenverschiebung hieraus zu erklären wären. Der Effekt könnte sich eventuell auf die inhomogene Dichteverteilung zwischen Frässpan und Altpapierflocken zurückführen lassen.

Tabelle 5-16 spezifische Wärmekapazität, Temperaturleitzahl, Wärmeeindringkoeffizient der geprüften Materialvarianten in unterschiedlichen Dichtestufen

Dichtestufe		H09	A09	C09	D09
$40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$	$u$ [%]	7,3	7,8	8,6	9,4
	$c_{\text{Hu}}$ [W/(kg*K)]	1550	1562	1580	1600
	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,040	0,041	0,042	0,043
	$a$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	0,60	0,61	0,61	0,61
	$b$ [ $\text{Ws}^{0,5}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	51,65	52,66	53,74	55,23
$50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$	$u$ [%]	6,2	6,3	6,9	7,6
	$c_{\text{Hu}}$ [W/(kg*K)]	1521	1525	1540	1557
	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,039	0,040	0,041	0,041
	$a$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	0,47	0,48	0,49	0,48
	$b$ [ $\text{Ws}^{0,5}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	56,61	57,45	58,44	59,03
$60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$	$u$ [%]	5,4	5,8	6,4	7,1
	$c_{\text{Hu}}$ [W/(kg*K)]	1502	1513	1526	1543
	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,039	0,039	0,040	0,040
	$a$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	0,40	0,40	0,40	0,40
	$b$ [ $\text{Ws}^{0,5}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	61,36	61,72	62,95	63,50
$70 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$	$u$ [%]	6,4	6,7	7,4	8,1
	$c_{\text{Hu}}$ [W/(kg*K)]	1528	1533	1552	1568
	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,040	0,040	0,040	0,040
	$a$ [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	0,35	0,34	0,34	0,33
	$b$ [ $\text{Ws}^{0,5}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	67,86	68,24	68,82	69,45

### 5.2.5 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand wurde entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.9 ermittelt. Die Mittelwerte und die Standardabweichung aus jeweils fünf Einzelversuchen sind für die unterschiedlichen Dichtestufen in Anhang 6 abgedruckt. In Abbildung 5-23 ist der Strömungswiderstand der geprüften Materialvarianten H01, H08, H09, A08, C08, D08, A09, C09 und D09 logarithmisch skaliert über der Einbringdichte aufgetragen. Über der logarithmischen Skalierung lässt sich eine gut bestimmte lineare Abhängigkeit erkennen, die zu einer den Zusammenhang beschreibenden e-Funktion führt (Tabelle 5-17).

Die ebenfalls aufgetragene Standardabweichung zeigt, dass die Bestimmung kleiner Strömungswiderstände im Bereich geringer Dichte und bei steigendem Anteil an FES größeren Ungenauigkeiten unterworfen ist. Diese resultieren aus der bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten sehr geringen Druckdifferenz. Hierbei steigt prinzipiell der Fehler bei der Druckmessung. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten wird wiederum die Anzeige der Druckmesswerte unruhig, da an dem Punkt an dem der Differenzdruck abgegriffen wird Turbulenzen entstehen.

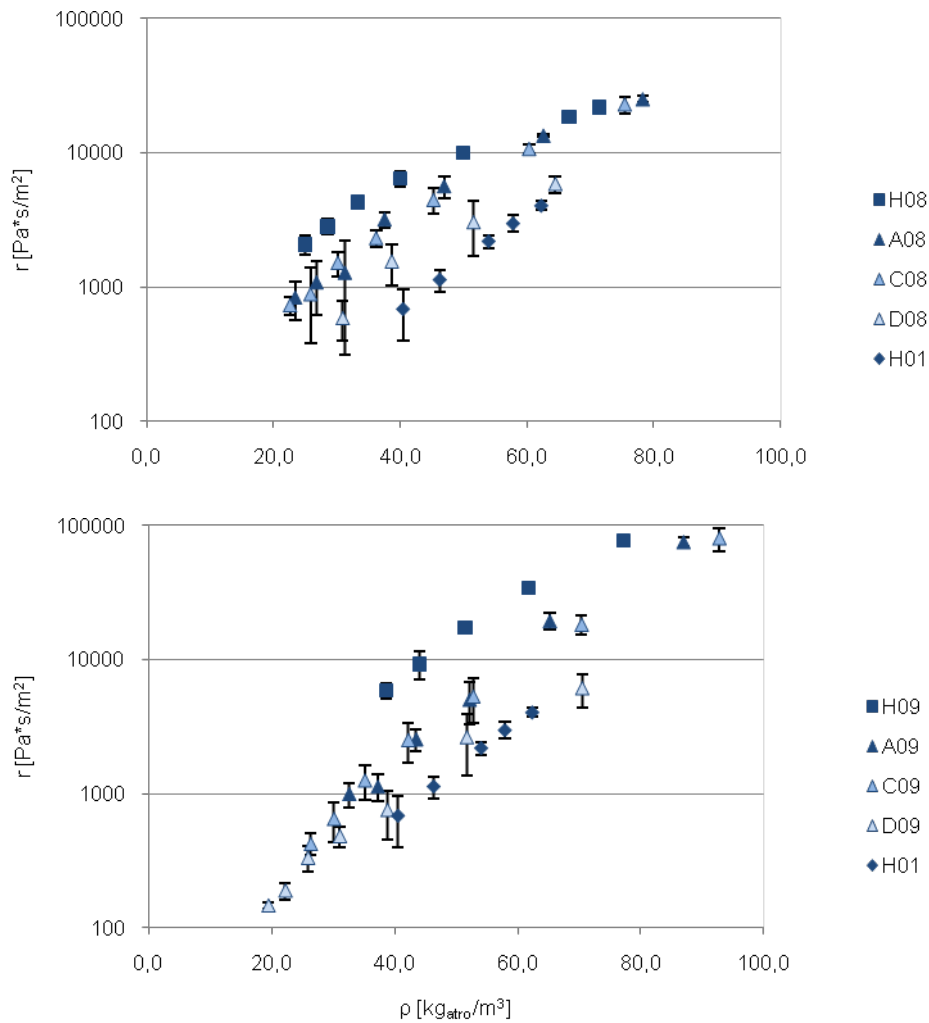


Abbildung 5-23 logarithmisch skaliertes Strömungswiderstand  $r$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ] in Abhängigkeit von der Einbringdichte für die Materialvarianten H01, H08, H09, A08, C08, D08, A09, C09 und D09



Es ist zu erkennen, dass höhere Anteile an FES und niedrigere Einbringdichten zu kleineren Strömungswiderständen führen. Die Mischungen weisen Strömungswiderstände auf, die zwischen den Werten der Einzelmaterialien liegen.

Aus den in Tabelle 5-17 angegebenen Regressionsparametern werden für die untersuchten Einzelmaterialien und Mischungen die Werte des Strömungswiderstandes  $r$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ] für eine Reihe von Einbringdichten berechnet und mit der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit verglichen, die sich aus den im Abschnitt 5.2.3, Tabelle 5-13, dargestellten Regressionen innerhalb der gleichen Materialvarianten ermittelt. Korrelationen zwischen Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand innerhalb einer Materialvariante über den Dichtebereich 20 - 90  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  ergeben durchgängig schwache Korrelationskoeffizienten. Vergleicht man Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand innerhalb einer Dichtestufe über die unterschiedlichen Materialvarianten hinweg, so lassen sich zwar im Bereich niedriger Dichte gut bestimmte negative Korrelationen beobachten, diese laufen allerdings mit steigender Dichte und dem Erreichen des Optimalbereichs der Wärmeleitfähigkeit gegen Null, um anschließend bei höheren Dichten in einen schwach bestimmten positiven Zusammenhang überzugehen.

Tabelle 5-17 Regressionsparameter für den Zusammenhang Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Einbringdichte

RKP	$r(\rho) = a_0 * a_1^\rho$		
	$a_1$	$a_0$	$R^2$
RKP H01	1,0857	25,0390	1,00
RKP H08	1,0498	763,3274	0,97
RKP H09	1,0689	500,9736	0,99
RKP A08	1,0662	212,4936	0,97
RKP C08	1,0677	191,7287	0,99
RKP D08	1,0671	99,0652	0,96
RKP A09	1,0870	63,8700	0,99
RKP C09	1,0803	74,5601	0,99
RKP D09	1,0763	43,2563	0,98

In Abbildung 5-24 ist für die Materialien FES H01, Faserstoff H08 und Zelluloseflocken H09 der Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Wärmeleitfähigkeit für die Dichtestufen 40, 45, 50, 55, 60, 65 und 70  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  abgebildet. Es ist zu erkennen, dass bei dem Material FES H01, das keinen Optimalbereich der Wärmeleitfähigkeit durchschreitet, zumindest im Bereich niedriger Einbringdichten ein linearer Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand innerhalb aufsteigender Stufen der Einbringdichte herzustellen ist. Ein absoluter Materialvergleich zwischen den aufgetragenen Einzelmaterialien zeigt, dass der Faserstoff mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit bei gleicher Dichte niedrigere Strömungswiderstände aufweist als die Altpapierflocken mit der höheren Wärmeleitfähigkeit.

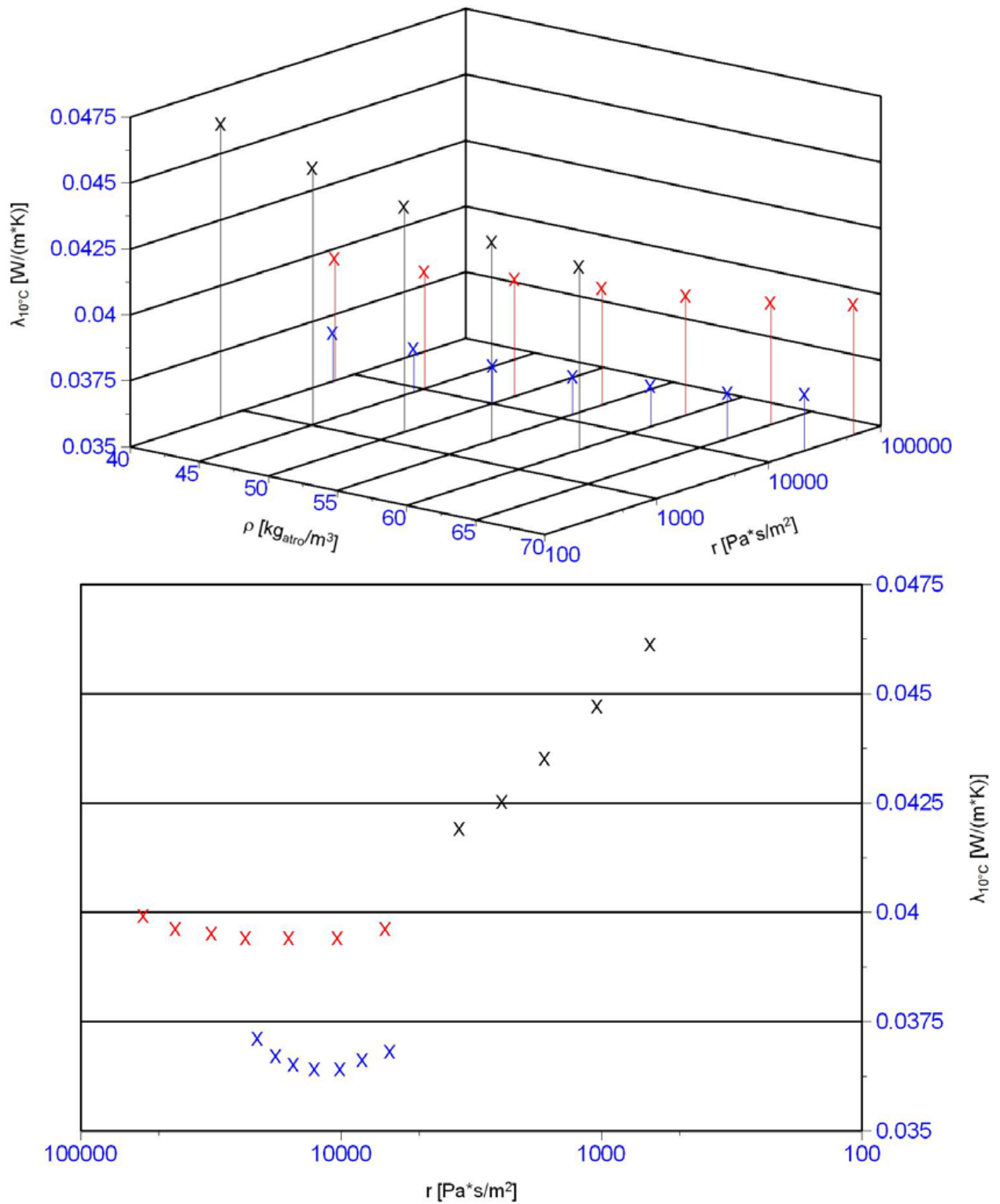


Abbildung 5-24 Zusammenhang zwischen Dichte, Strömungswiderstand und Wärmeleitfähigkeit der Materialien FES H01 (schwarze Datenpunkte), Faserstoff H08 (blaue Datenpunkte) und Altpapierflocken H09 (rote Datenpunkte)

## 5.2.6 Setzungsverhalten

Zum Setzungsverhalten der Einzelmaterialien und daraus hergestellter Mischungen wurden unterschiedliche Prüfungen durchgeführt.

### 5.2.6.1 Kleinversuche entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.1

Die volumenstabile Dichte der in den Hauptversuchen verwendeten Einzelmaterialien H01, H02, H08 und H09 sowie aller zwei- und ausgewählter dreikomponentiger Mischungen wurde mit dem Kleinprüfstand, wie in 4.2.2.1 beschrieben, bestimmt. Die Ergebnisse der Einzelversuche sowie die Ergebnisstatistik finden sich in tabellarischer Form im Anhang 7 - Anhang 9. Um den in der geprüften Mischung tatsächlich vorliegenden Anteil an FES H01, ausgedrückt in Massenprozent bezogen auf die Gesamtmasse des Kompositdämmstoffs, zu bestimmen, wurde bei allen zwei- und dreikomponentigen Mischungen nach jedem Versuch die vorliegende Probenmenge repräsentativ geteilt, bis eine Teilmenge mit einem Probenvolumen von ca.  $1 \text{ dm}^3$  vorlag, mit der eine Mischgütebestimmung entsprechend 4.2.2.5 durchgeführt werden konnte. Auf diese Weise kann jedem Einzelwert der Setzungsversuche die tatsächlich in der Probe vorliegende Konzentration des Anteils an FES  $c_k$  gegenübergestellt werden. Es ist festzustellen, dass die gemessenen Anteile an FES zum Teil deutlich von der angestrebten Konzentration, also den Soll-Anteilen in der Grundgesamtheit, abweichen. Dies betrifft insbesondere die untersuchten Mischungen mit Faserstoff. Die Ergebnisdarstellung bezieht sich deshalb auf die tatsächlich erzielten Anteile an FES. In Tabellen, in denen lediglich auf die Mischungskennziffer verwiesen ist, kann der tatsächlich vorhandene Anteil an FES aus den entsprechenden Ergebnistabellen im Anhang entnommen werden. Eine Diskussion der Mischgüten erfolgt in einer separaten Auswertung.

Nach Ende der Versuchsreihe zum Setzungsverhalten mit den zweikomponentigen Mischungen (Anhang 8) stellte sich heraus, dass zwar die Temperaturregelung des Raumklimagerätes funktioniert hatte, die Luftfeuchteregeung aber ausgefallen war, was eine niedrigere r. F. von ca. 30 % zur Folge hatte. Die gemessenen Materialfeuchten sind deshalb mit 5 % - 6 % entsprechend niedriger, als dies bei 23/50 zu erwarten gewesen wäre. Ausgewählte zwei- und dreikomponentige Mischungsvarianten wurden deshalb in einer zweiten Versuchsreihe nach Lagerung in einem funktionierenden Klima bei 23/50 erneut geprüft (Anhang 9). Im Folgenden sind ausgewählte Ergebnisse graphisch aufbereitet.

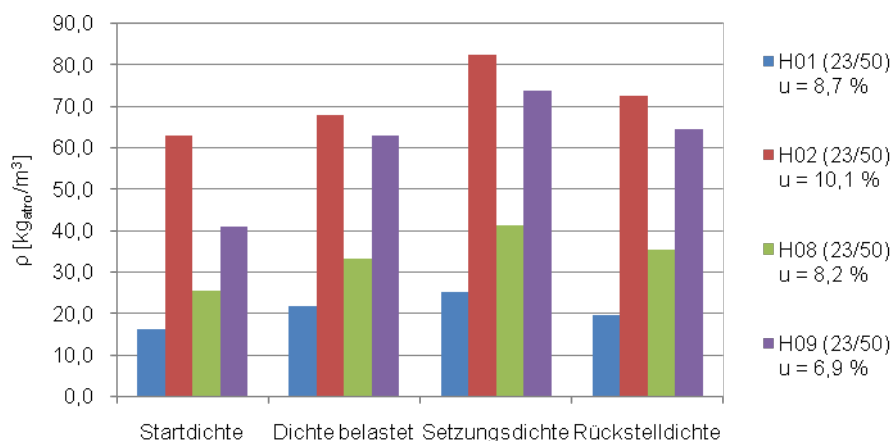


Abbildung 5-25 Dichtestufen entsprechend den Versuchsschritten; Materialien: H01, H02, H08, H09; Klimatisierung: 23/50

Um noch einmal den Versuchsablauf in Erinnerung zu rufen, ist in Abbildung 5-25 für die geprüften Einzelmaterialien H01, H02, H08 und H09 die Entwicklung der Dichte  $[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$  nach den einzelnen

Versuchsschritten dargestellt. Der abgebildete Verlauf stellt sich bei allen geprüften Materialvarianten ein. Ausgehend von der Startdichte (= Streudichte) erhöht sich die Dichte zuerst durch die statische Last des Auflagergewichtes (Dichte belastet). Als Setzungsdichte wird schließlich die Dichte bezeichnet, die sich nach 35 min Vibrationsbelastung entsprechend der Versuchsbeschreibung in 4.2.2.1 einstellt. Anschließend wird die Rückstelldichte ermittelt. Diese bezieht sich auf die Setzungshöhe nach 5 min Vibrationsbeanspruchung mit entferntem Auflagergewicht.

#### 5.2.6.1.1 Zusammenhang zwischen Streudichte und Setzungsdichte

Die im Rahmen des Material- und Methodenscreenings diskutierten Zusammenhänge bezüglich des Setzungsverhaltens der dort geprüften Mischungen im Vergleich mit den Werten des jeweiligen Kompositpartners als Einzelmaterial zielen darauf ab, das Verhalten sehr unterschiedlicher Materialstrukturen in Mischung mit dem FES zu charakterisieren. Im Folgenden soll vor allem der Einfluss der unterschiedlichen Mischungsverhältnisse auf die untersuchten Materialkombinationen aus FES und Kompositpartner herausgearbeitet werden. Einleitend sind in Abbildung 5-26 die Werte Dichte belastet, Setzungsdichte sowie die Rückstelldichte jeweils aufgetragen über der Startdichte abgebildet. In dieser Graphik wurden alle gemittelten Werte aus Anhang 7, Anhang 8 und Anhang 9 zusammengeführt. Die logarithmischen Ausgleichskurven beziehen sich jeweils auf die Dichtestufe eines Versuchsschrittes (entsprechend Abbildung 5-25).

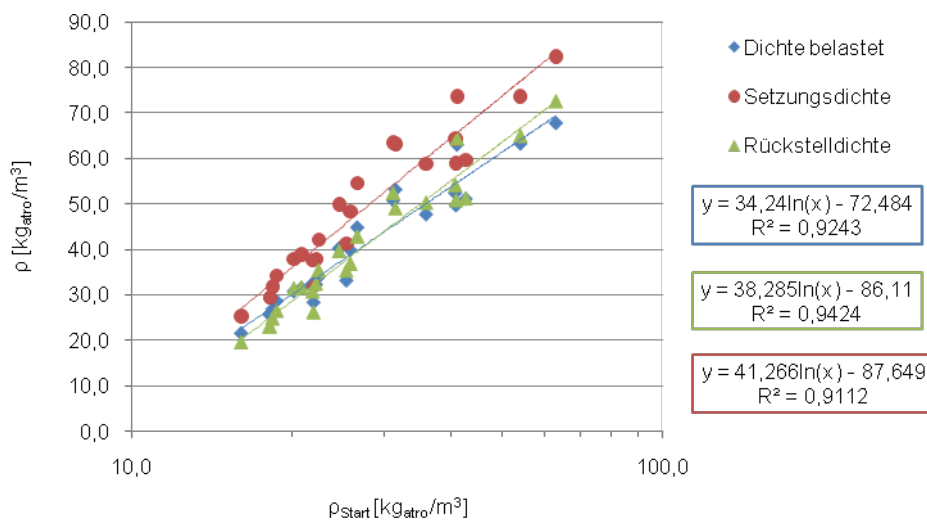


Abbildung 5-26 Zusammenhang zwischen der Startdichte (logarithmisch aufgetragen) und der Dichte nach unterschiedlichen Versuchsschritten für die geprüften Materialvarianten (Daten siehe: Anhang 7 - Anhang 9)

Für jede Verdichtungsstufe besteht jeweils zur Startdichte ein gut bestimmter logarithmischer Zusammenhang. Auch zwischen den drei Kurven lässt sich eine sehr gute Korrelation nachweisen (Tabelle 5-18).

Tabelle 5-18 Korrelationskoeffizienten R [-] für den Zusammenhang zwischen den gemittelten Dichten nach unterschiedlichen Versuchsschritten für die geprüften Materialvarianten entsprechend Anhang 7 - Anhang 9

R [-]	$\rho_{\text{Start}}$	$\rho_{\text{bel}}$	$\rho_{\text{Setz}}$	$\rho_{\text{Rück}}$
$\rho_{\text{Start}}$	1,00	0,93	0,92	0,95
$\rho_{\text{bel}}$	-	1,00	1,00	0,99
$\rho_{\text{Setz}}$	-	-	1,00	0,99
$\rho_{\text{Rück}}$	-	-	-	1,00

### 5.2.6.1.2 Zusammenhang zwischen Setzungsdichte und Mischungsverhältnis

Wie beschrieben, wurde nach jedem Einzelversuch durch eine Mischgütebestimmung das tatsächlich vorliegende Mischungsverhältnis (MV) bestimmt. Hierbei zeigt sich, dass vor allem bei den Mischungen mit Fichte Hobelspan H02 und Faserstoff H08 einerseits teilweise deutliche Abweichungen vom angestrebten MV zu beobachten sind und andererseits auch die Streuung der Konzentration des FES zwischen den Proben mehr oder weniger stark schwankt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Einzelversuche der durchgeführten Prüfreihe über dem durch die Mischgütebestimmung ermittelten Anteil des FES H01 (= MV) aufgetragen. Die eingezeichneten Regressionspolynome 2. Grades (RGP) beziehen sich dabei jeweils auf Versuche einheitlicher Klimatisierung. Das RGP (Raumkl.) bezieht sich auf die Daten nach Anhang 8; das RGP (23/50) auf die Daten nach Anhang 7 und Anhang 9. Die zugehörigen Koeffizienten und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sind zusammen mit den Koeffizienten der 1. Ableitung der Regressionspolynome in Tabelle 5-19 abgedruckt.

Tabelle 5-19 Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der Regressionspolynome und die 1. Ableitung für den Zusammenhang Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über MV [%]

Nr.	RGP	$\rho_{\text{Setz}}(\text{MV}) = a_2 * \text{MV}^2 + a_1 * \text{MV} + a_0$			$R^2$
		$a_2$	$a_1$	$a_0$	
I	RGP 02 (Raumkl.)	21,1442	-71,4101	80,2535	0,90
II	RGP 08 (23/50)	-18,7686	3,2588	41,4249	0,97
III	RGP 08 (Raumkl.)	-28,6004	14,0459	36,3970	0,94
IV	RGP 09 (23/50)	30,2522	-78,2345	73,4946	0,99
V	RGP 09 (Raumkl.)	17,3227	-69,9092	70,2541	0,97
Nr.	1. Ableitung		$a_1$	$a_0$	
I'	RGP 02 (Raumkl.)	0	42,2884	-71,4101	
II'	RGP 08 (23/50)	0	-37,5371	3,2588	
III'	RGP 08 (Raumkl.)	0	-57,2007	14,0459	
IV'	RGP 09 (23/50)	0	60,5043	-78,2345	
V'	RGP 09 (Raumkl.)	0	34,6455	-69,9092	

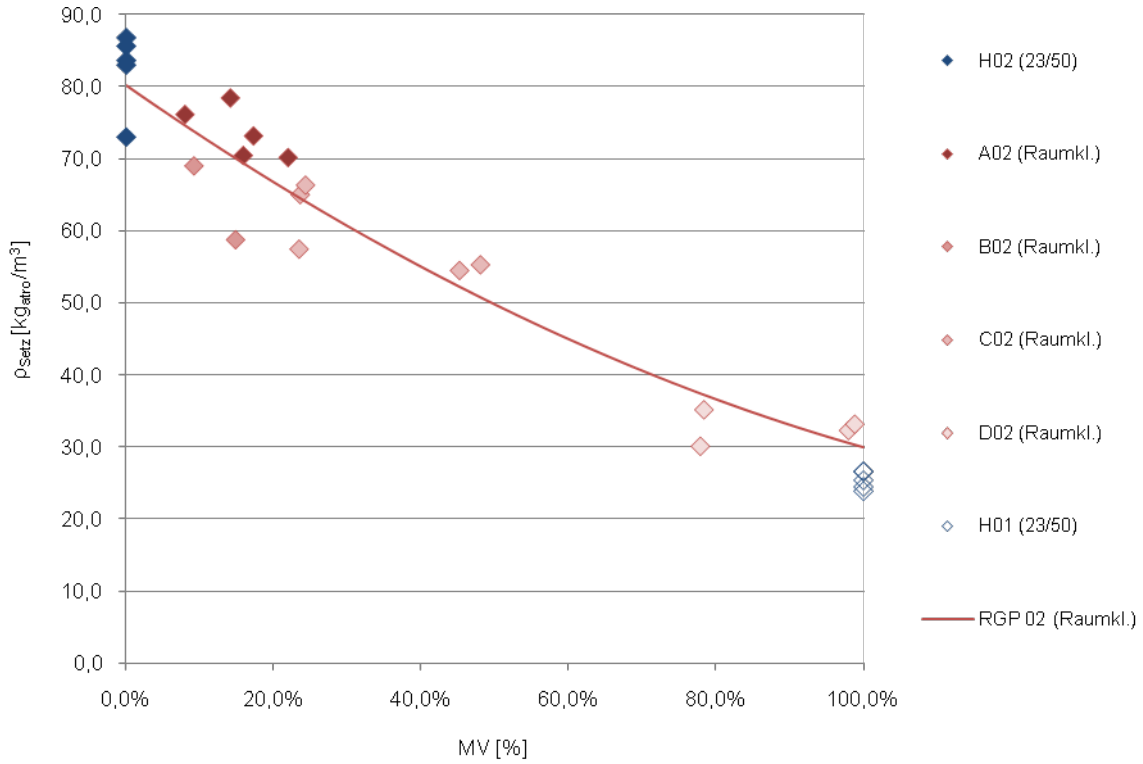


Abbildung 5-27 Setzungsdichte [kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup>] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A02, B02, C02, D02 und H02 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (Raumkl.):  $R^2 = 0,90$

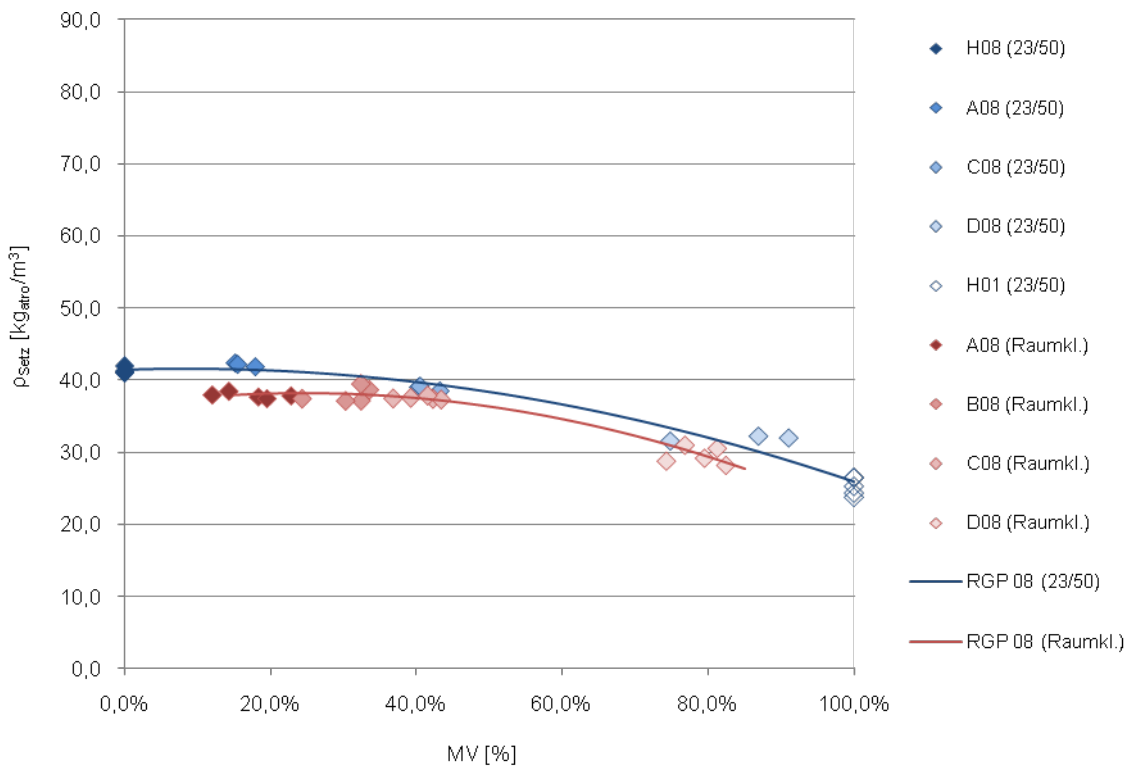


Abbildung 5-28 Setzungsdichte [kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup>] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A08, B08, C08, D08 und H08 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (23/50):  $R^2 = 0,97$ ; RGP (Raumkl.):  $R^2 = 0,94$

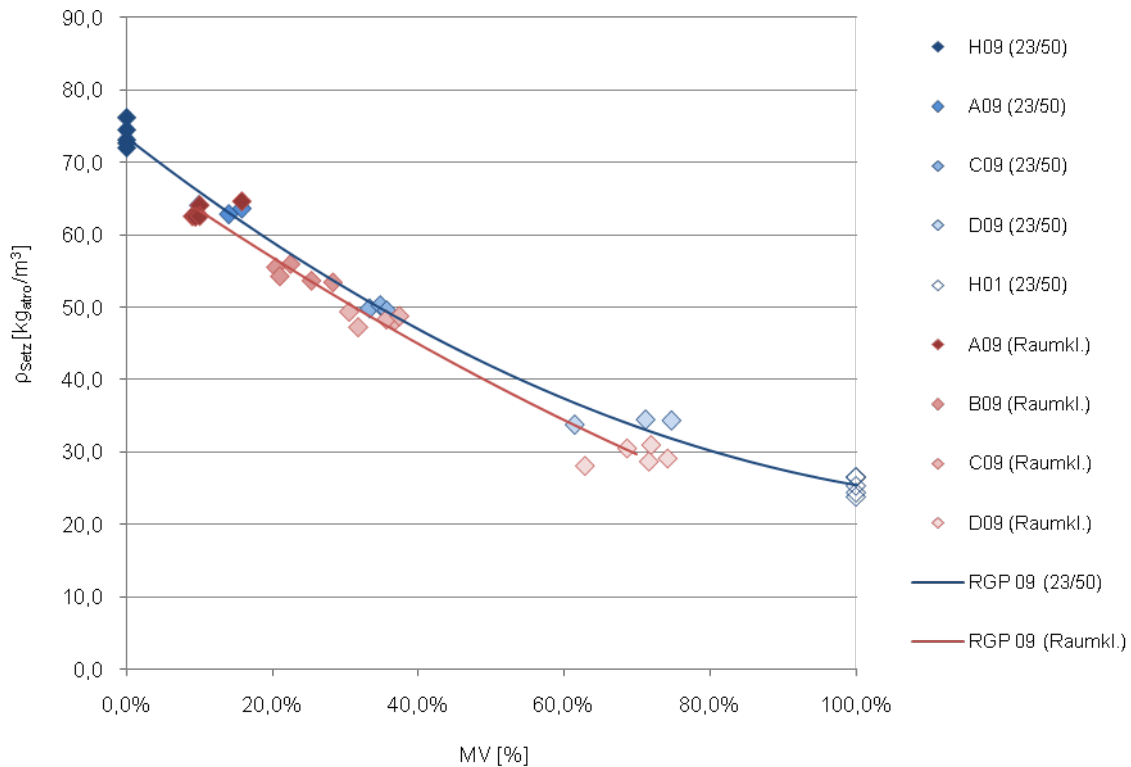


Abbildung 5-29 Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Materialvarianten H01, A09, B09, C09, D09 und H09 bei unterschiedlicher Klimatisierung; RGP (23/50):  $R^2 = 0,99$ ; RGP (Raumkl.):  $R^2 = 0,97$

Augenscheinlich wird deutlich, dass sich der prinzipielle Verlauf des Zusammenhangs, Setzungsdichte über Mischungsverhältnis, zwischen den Mischungen mit unterschiedlichen Kompositpartnern deutlich unterscheidet. Die Funktionen Nr. I, IV und V (Tabelle 5-19) sind konvex, die Funktionen Nr. II und III konkav. Für den Verlauf bedeutet dies: Während die Funktionen RGP 02 (Raumkl.) für die Mischungen zwischen FES und Fichte Hobelspan (Abbildung 5-27) sowie RGP 09 (23/50) für die Mischungen zwischen FES und Altpapierflocken (Abbildung 5-28) mit steigendem Anteil an FES, anfänglich annähernd linear relativ steil abfallen und ab ca. 50 % Anteil an FES flacher werden, um schließlich bei höheren Anteilen an FES auf den Wert des Materials H01 einzuschwenken, verläuft die Funktion RGP 08 (23/50) für die Mischungen zwischen FES und Faserstoff (Abbildung 5-29) anfänglich auf konstantem Niveau parallel zur Abszisse und fällt erst spät auf den Wert des Materials H01. Geringe Anteile an FES beeinflussen also in Beimengung zu den Materialien Fichte Hobelspan H02 und Altpapierflocken H09 den Wert der Setzungsdichte deutlich, während, bezogen auf die Masse, die selben Mischungsverhältnisse bei der Materialkombination H01 mit Faserstoff H08 ohne Wirkung auf die Setzung bleiben.

Um den Punkt im Verlauf der Funktion zwischen Setzungsdichte und Mischungsverhältnis bestimmen zu können, an dem die Steigung der Tangente gleich der Steigung einer interpolierten Geraden zwischen den Setzungsdichten der an einer Mischung beteiligten Einzelmaterialien (Anhang 7), aufgetragen auf der gleichen Abszisse, ist, werden die 1. Ableitungen der Funktionen nach Tabelle 5-19 mit der Steigung der entsprechenden Geraden gleichgesetzt und nach dem zugehörigen Anteil an FES [%] aufgelöst. Der so berechnete Punkt auf der Abszisse repräsentiert, ausgehend von 0 % Anteil an FES, das Mischungsverhältnis, ab dem der Einfluss der FES bezüglich der Setzung den Einfluss des Kompositpartners B überwiegt (Abbildung 5-27 und Abbildung 5-29) bzw. ab dem die Komponente FES gegenüber dem Kompositpartner an Einfluss gewinnt (Abbildung 5-28). Außerdem

repräsentiert dieser Punkt das MV, an dem, ein konkaver Zusammenhang vorausgesetzt, der größte Unterschied zwischen der linearen Interpolation der Setzungsdichten der Einzelmaterialien und dem tatsächlich ermittelten Verlauf entsteht. Der zugehörige Funktionswert wird im Folgenden als  $MV_{\Delta\rho_{Max}}$  bezeichnet.

Tabelle 5-20 zeigt die Regressionsparameter der zwischen den gemittelten Setzungsdichten der jeweiligen Kompositpartner und dem als Einzelmaterial vorliegenden FES linear interpolierten Geraden (Nr. ii und iii). Um nicht Versuchsreihen unterschiedlicher Klimatisierung zu verquicken, bezieht sich die RGP Nr. i (RGP H01-H02) nicht auf die gemittelten Werte der Einzelmaterialien entsprechend Anhang 7, sondern hat die aus Gleichung Nr. I in Tabelle 5-19 zu ermittelnden Werte für 0 % und 100 % MV zur Grundlage der linearen Interpolation.

Die in Tabelle 5-20 abzulesende Steigung  $a_1$  der Funktionen Nr. i – iii wird als Wert der 1. Ableitung der Funktionen aus Tabelle 5-19 eingesetzt und führt so zu dem angegebenen Mischungsverhältnis  $MV_{\Delta\rho_{Max}}$ , das für alle drei betrachteten Zusammenhänge bei ca. 50 % FES liegt.

Tabelle 5-20 Lineare Interpolation (i – iii) und daraus abgeleitetes  $MV_1$  und  $\Delta$ Setzungsdichte

		$y(x) = a_2 * x^2 + a_1 * x + a_0$			
Nr.	RGP	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$R^2$
i	RGP H01-H02	0	-50,2658819	80,253493	1,00
ii	RGP H01-H08	0	-15,922727	41,2533478	1,00
iii	RGP H01-H09	0	-48,331676	73,6622967	1,00
Nr.	RGP		$MV_1$	$\Delta$ Max	
I	RGP 02 (Raumkl.)		50,0%	5,3 $kg_{atro}/m^3$	
II	RGP 08 (23/50)		51,1%	-5,1 $kg_{atro}/m^3$	
IV	RGP 09 (23/50)		49,4%	7,6 $kg_{atro}/m^3$	

In Abbildung 5-30 sind beispielhaft für den Zusammenhang entsprechend RGP 09 (23/50) die ausgeführten Überlegungen noch einmal graphisch dargestellt.

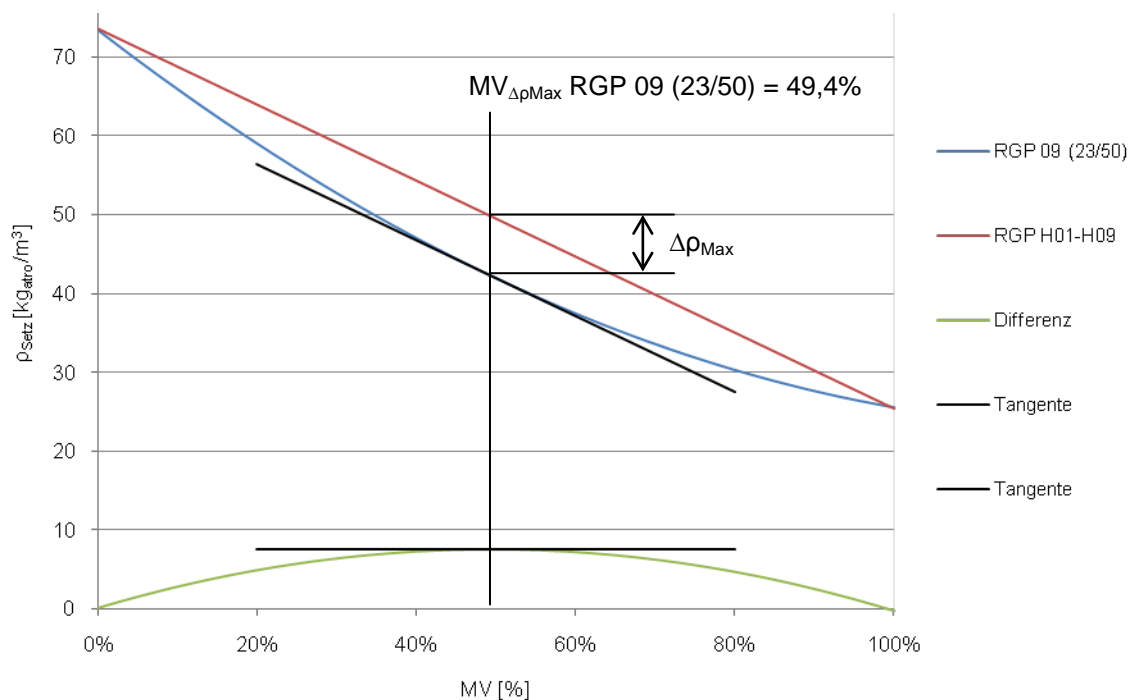


Abbildung 5-30 graphische Herleitung des  $MV_{\Delta\rho_{Max}}$



Weiter ist zu beobachten, dass die Versuche im unklimateisierten Raumklima mit Materialfeuchten, die im Mittel ca. 3 % trockener ausfallen als die entsprechenden Versuche im Klima bei 23/50, durchgängig zu niedrigeren Setzungsdichten führen. Die Regressionspolynome RGP \*\* (Raumklima) liegen bei Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 unter den RGP \*\* (23/50). Zudem fällt bei Abbildung 5-29 auf, dass der Unterschied zwischen den Setzungsdichten bei feuchterem und trockenerem Material mit höheren Anteilen an FES leicht zunimmt.

Das Verständnis für den bei Mischungen mit Faserstoff prinzipiell unterschiedlichen Verlauf des Zusammenhangs von Setzungsdichte über Mischungsverhältnis erfordert zunächst eine getrennte Betrachtung der partiellen Dichten der beiden Kompositpartner in Mischung, in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses (Anteil FES H01 [%]). Aus den aus der Mischgütebestimmung bekannten Anteilen an FES in der Mischung kann sowohl die Dichte des Anteils der FES und durch Differenzbildung zur Setzungsdichte des Komposits auch die Dichte der Komponente B errechnet werden. Die Koeffizienten der aus diesen Daten bestimmten Regressionspolynome sind in Tabelle 5-21 dargestellt. Entsprechend den in Tabelle 5-19 gewählten Bezeichnungen für die Funktionen wird die partielle Dichte der Komponente A als \*Nr.\*-A, die der Komponente B als \*Nr.\*-B bezeichnet. Um den Zusammenhang zu wahren, sind die Koeffizienten der Funktionen Nr. II und IV erneut abgedruckt.

Tabelle 5-21 Koeffizienten der Regressionspolynome zu den partiellen Dichten der Komponenten A und B im Komposit

Nr.	RGP	$\rho_{\text{part}}(MV) = a_2 * MV^2 + a_1 * MV + a_0$			$R^2$
		$a_2$	$a_1$	$a_0$	
II	RGP 08 (23/50)	-18,7686	3,2588	41,4249	0,97
II-A	RGP 08 (23/50) - Komp. A	-24,0856	50,5191	-0,2643	0,99
II-B	RGP 08 (23/50) - Komp. B	5,3171	-47,2603	41,6892	1,00
IV	RGP 09 (23/50)	30,2522	-78,2345	73,4946	0,99
IV-A	RGP 09 (23/50) - Komp. A	-33,9940	58,7259	0,4282	0,99
IV-B	RGP 09 (23/50) - Komp. B	64,2462	-136,9605	73,0664	1,00

In Abbildung 5-31 und Abbildung 5-32 lässt sich erkennen, dass der Verlauf der Dichte der Komponente FES H01 in beiden Kompositsystemen annähernd gleich verläuft. Deutlich zu unterscheiden ist hingegen die Veränderung der Dichte des Kompositpartners im Gemisch bei aufsteigenden Anteilen an FES.

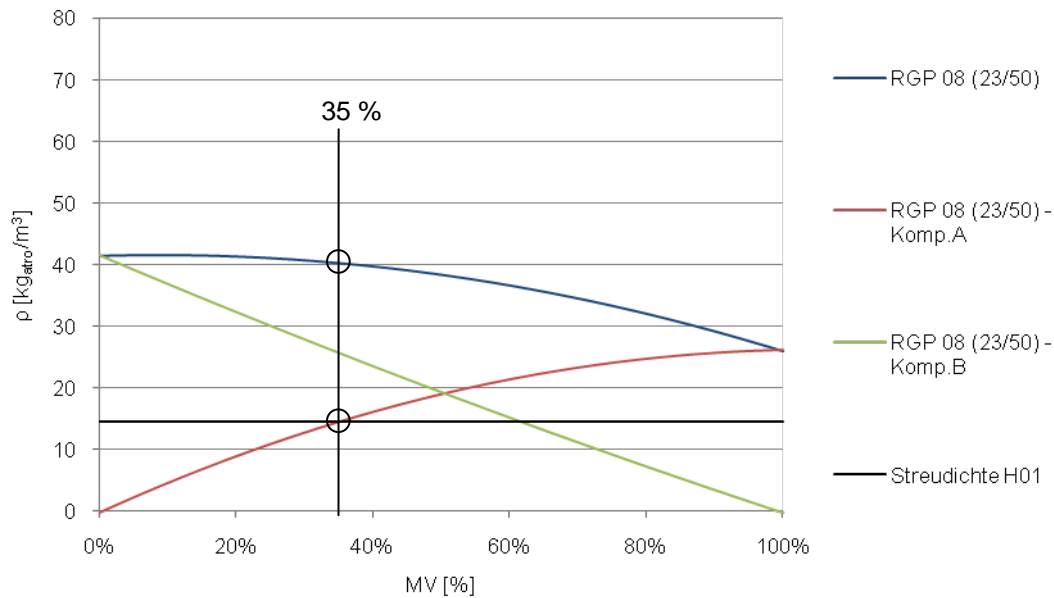


Abbildung 5-31 Regressionspolynome RGP 08 (23/50) mit dem Verlauf der partiellen Dichten der beteiligten Kompositpartner A (FES H01) und B (Faserstoff H08); Ordinate gilt für: Setzungsdichte Komposit, partielle Setzungsdichte A + B, Streudichte H01

Für Mischungen zwischen den Materialien FES H01 und Faserstoff H08 (RGP 08 (23/50)) lässt sich feststellen, dass die Dichte der Faserstoffkomponente im Bereich zwischen 0 % - 100 % FES praktisch linear, d. h. entsprechend dem sinkenden Massenanteil an der Mischung, abnimmt. Der nichtlineare Verlauf der Setzungsdichte des Komposits (RGP 08 → konkave Funktion) lässt sich dadurch erklären, dass der Anteil an FES bei niedrigeren Dichten anfangs keinen oder nur einen geringen Beitrag zur Setzungssicherheit leisten kann, da anfänglich (partielle Dichte H01 < Streudichte) der Verbund der Späne untereinander fehlt. Eine Substitution von Faserstoff durch entsprechende Massenanteile FES führt in diesem Dichtebereich zwar zu der linearen Verringerung der partiellen Dichte des Faserstoffanteils, diese Dichtereduktion wird allerdings durch die Beimengung des FES kompensiert.

Warum die Dichte des FES mit steigenden Massenanteilen nun nicht ebenso linear zunimmt, könnte mit der Art der Einbettung der Späne in die Materialmatrix des Faserstoffs erklärt werden. Solange die FES noch keinen geschlossenen Verbund untereinander ausbilden können, liegen diese mehr oder weniger voneinander getrennt zwischen den im Zuge der Vibrationsbeanspruchung agglomerierenden Faserknäuel. Das heißt, es werden zwar Faserstoffagglomerate untereinander begrenzt, diese sind aber zu groß, als dass sich der Einzelspan hier positiv auf die Setzung auswirken könnte. Die im Gegensatz zum fein aufgeschlossenen Faserstoff bei gleichem Volumen (als Einzelpartikel) schwereren Spanpartikel führen dazu, dass die Setzungsdichte des Komposits anfänglich auf konstantem Niveau verläuft. Die Reduzierung des Anteils an Faserstoff (Setzungsdichte ↓) ist zwar durch eine gewisse Stützwirkung des FES möglich. Der Effekt wird allerdings durch die ohne stützenden Verbund zueinander eingebetteten und volumenbezogen schwereren Spanpartikel (Setzungsdichte ↑) aufgehoben. Die Setzungsdichte bleibt anfänglich konstant.

Eine Beeinflussung der Setzungsdichte des Komposits findet erst ab dem Punkt statt, an dem die partielle Setzungsdichte des FES im Gemisch den Wert der Streudichte des Einzelmaterials H01 = 14,6 kgatro/m<sup>3</sup> erreicht. Dies ist für den Punkt der volumenstabilen Dichte bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen unter den Randbedingungen der Messmethode ab 35 % FES erfüllt (Abbildung 5-31).

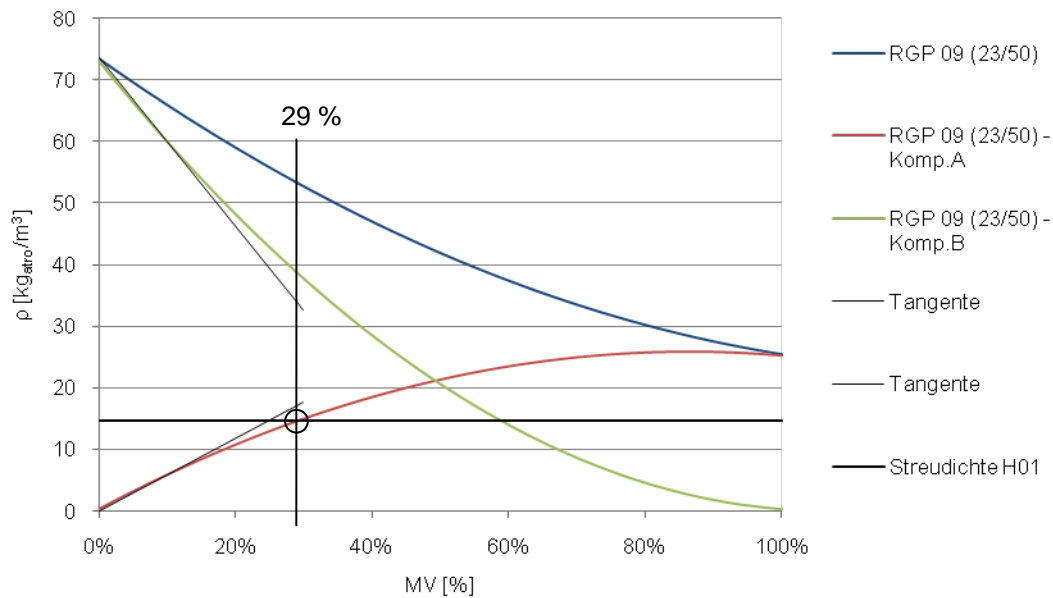


Abbildung 5-32 Regressionspolynome RGP 09 (23/50) mit dem Verlauf der partiellen Dichten der beteiligten Kompositpartner A (FES H01) und B (Altpapierflocken H09); Ordinate gilt für: Setzungsdichte Komposit, partielle Setzungsdichte A + B, Streudichte H01

In Abbildung 5-32 sind die partiellen Setzungsdichten der Komponenten A und B für die Mischungen zwischen FES H01 und Altpapierflocken H09 dargestellt. Der konvexe Verlauf der Funktion RGP 09 (23/50) resultiert aus der im Verhältnis größeren negativen Steigung der Tangenten an der Funktion RGP 09 (23/50)-Komp.B gegenüber der positiven Steigung der Tangenten an der Funktion RGP 09 (23/50)-Komp.A. Dieses Verhältnis bleibt über alle Mischungsverhältnisse hinweg qualitativ erhalten, wird jedoch bei größeren Anteilen an FES kleiner. Der Verlauf der partiellen Setzungsdichte der FES RGP 09 (23/50)-Komp. A verhält sich annähernd parallel zur Funktion RGP 08 (23/50)-Komp. A.

Offensichtlich kann also das FES bei den Mischungen mit den Altpapierflocken bereits bei niedrigen partiellen Dichten eine stabilisierende Wirkung entfalten. Die Einbettung der FES in die Matrix aus Altpapierflocken muss sich demnach grundlegend von dem Kompositgemisch aus FES und Faserstoff unterscheiden. Eine Erklärung könnte in der im Gegensatz zum Faserstoff lockereren, flockigeren Materialstruktur der Altpapierflocken zu suchen sein, die keine ausgeprägte Agglomeration zeigen. Hier können sich bei niedrigeren Anteilen an FES (< Streudichte) bereits einzelne Spanpartikel kommaförmig homogen in die Altpapier einbetten und somit eine Setzungsdichtereduzierung des Kompositmaterials durch eine federelastische Aussteifung der Struktur bewirken. In Abbildung 5-33 ist die vorangestellte Überlegung als Prinzipskizze bildlich dargestellt.

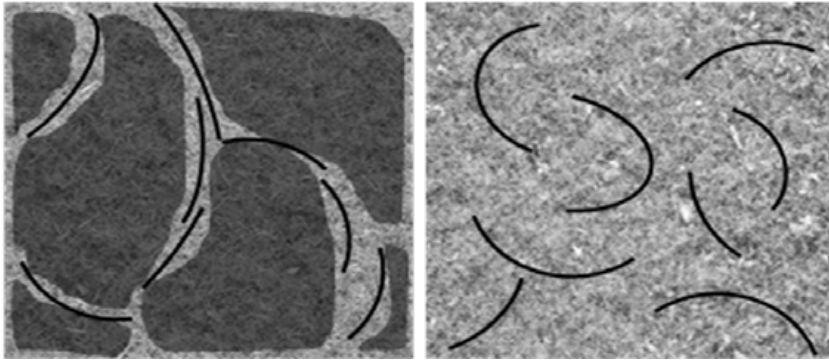


Abbildung 5-33 Links: Modell zur Einbettung der FES in die Materialmatrix der Komponente Faserstoff H08 (dunkle Bereiche sind Agglomerate); Rechts: Altpapierflocken H09 mit homogener Verteilung der FES in einer lockeren Materialstruktur

Abschließend sind in Abbildung 5-34 die Mittelwerte der Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] sowie die mittlere prozentuale Erhöhung der Setzungsdichte bezogen auf die Streudichte [%] und die mittlere prozentuale Reduzierung der Rückstelldichte bezogen auf die Setzungsdichte [%] für die Daten aus Anhang 7 und Anhang 9 gegenübergestellt.

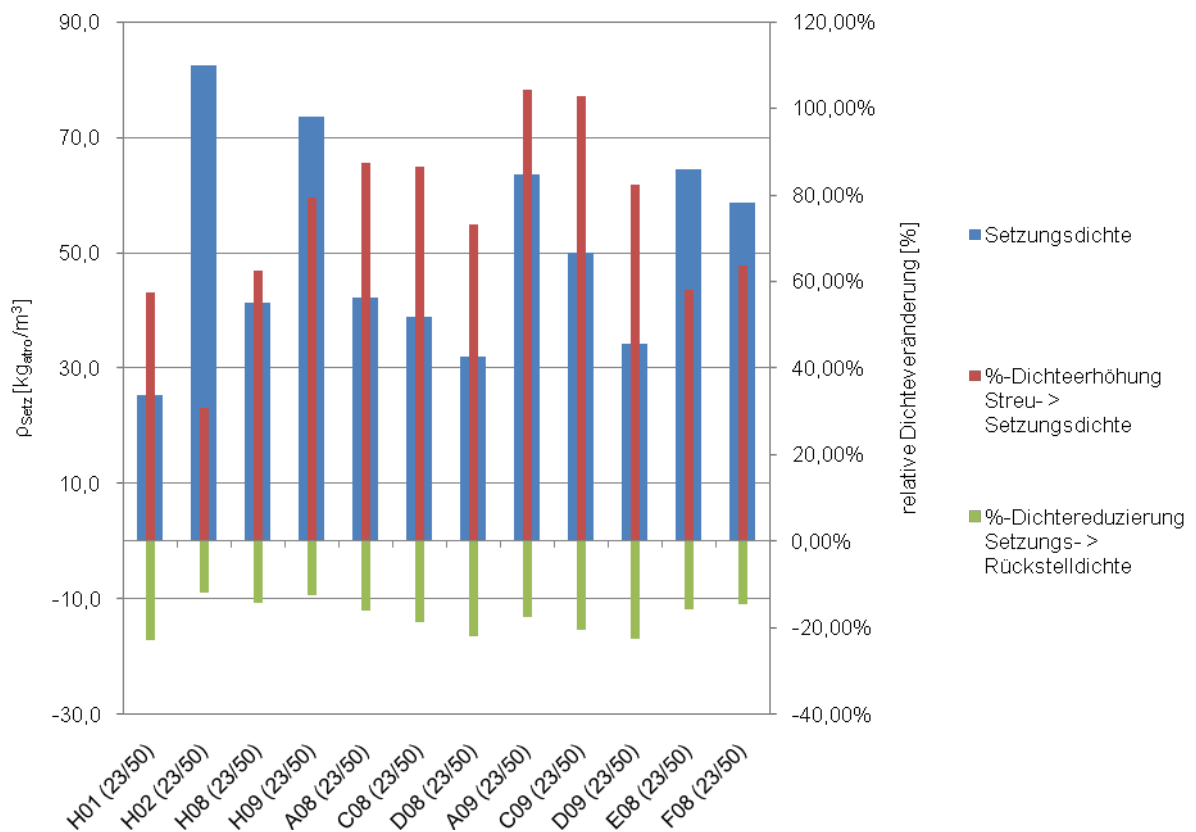


Abbildung 5-34 Mittelwerte der Setzungsdichte [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]; Setzungsdichte, bezogen auf die Streudichte [%]; Rückstelldichte, bezogen auf die Setzungsdichte [%]; (Anhang 7, Anhang 9)

Tendenziell zeigt sich über alle Varianten hinweg, dass mit steigendem Anteil an FES bei den zweikomponentigen Mischungen die relative Setzung abnimmt und das Rückstellvermögen zunimmt. Dabei ist auffällig, dass der absoluten Dichtereduzierung von MV A – D die Entwicklung der Rückstelldichte folgt, die prozentuale Dichteerhöhung zwischen den MV A – C jedoch anfänglich relativ konstant bleibt und erst bei MV D weiter abfällt. Anfänglich sind also die Dichtereduzierung der Streudichte und die Dichtereduzierung der Setzungsdichte konstant, bis ab einem gewissen Punkt die

Streudichtereduzierung größer wird als die entsprechende Auswirkung auf die Setzung (siehe auch Abbildung 5-26). Dem entgegen steht anscheinend das Verhalten bei der prozentualen Reduzierung der Rücksteldichte, welche mit steigendem Anteil an FES kontinuierlich größer wird.

Das Setzungsverhalten der 3-komponentigen Mischungen liegt im Bereich der Werte der beteiligten Einzelmaterialien.

### 5.2.6.1.3 Zusammenhang zwischen Startdichte und Mischungsverhältnis

Der Zusammenhang zwischen der Startdichte der Mischungen im Prüfzylinder und dem Mischungsverhältnis ist in Abbildung 5-35 dargestellt.

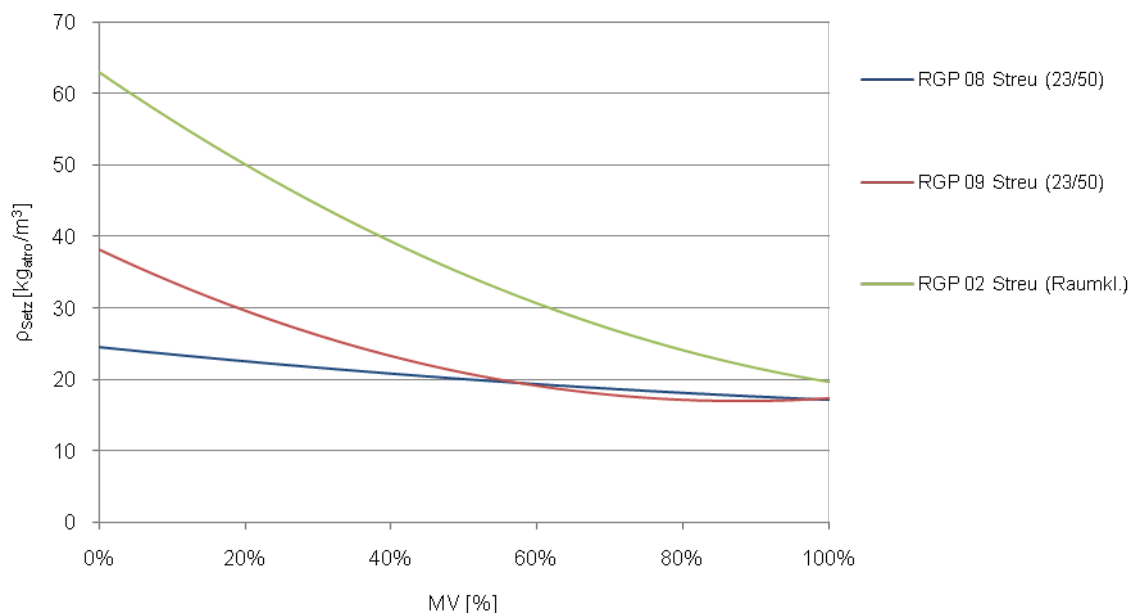


Abbildung 5-35 Streudichte [kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup>] über dem Anteil FES an der Gesamtmasse [%] für die Mischungen mit Fichte Hobelspan 02 (RGP 02 Streu KV (Raumkl.)), Faserstoff H08 (RGP 08 Streu KV (23/50)) und Altpapierflocken H09 (RGP 09 Streu KV (23/50))

Als Bezug auf der x-Achse dient, wie in der vorhergehenden Diskussion, der Anteil der Komponente FES H01 in der Einzelprobe, der mit Hilfe der Mischgütebestimmung errechnet wurde. Zur Bestimmung der Regressionspolynome (Tabelle 5-22) wurde jeweils die Startdichte im Zylinder vor der Messung herangezogen. Hier entstehen Unterschiede zwischen den geprüften Einzelmaterialien (Realisierungen: 0 % und 100 % FES) und den in dieser Auswertung zusammen betrachteten Mischungen A\*\*, C\*\* und D\*\*, da bei den Prüfungen der Einzelmaterialien das zu prüfende Material vor der Prüfung entsprechend der nach 4.2.1.4 mit der Vibrationsrinne ermittelten Streudichte abgewogen wurde, während die geprüften Mischungen direkt in den Zylinder eingefüllt wurden, bis die Starthöhe von 250 mm erreicht war.

Tabelle 5-22 Regressionspolynome für den Zusammenhang Startdichte in Abhängigkeit des Mischungsverhältnis

Nr.	RGP	$\rho_{\text{Start}}(\text{MV}) = a_2 \cdot \text{MV}^2 + a_1 \cdot \text{MV} + a_0$			$R^2$
		$a_2$	$a_1$	$a_0$	
V	RGP 02 Streu KV (Raumkl.)	26,4448	-69,7998	63,0019	0,95
VI	RGP 08 Streu KV (23/50)	3,1124	-10,4428	24,5672	0,94
VII	RGP 09 Streu KV (23/50)	27,4958	-48,4169	38,2157	0,96

Eine Bewertung des Zusammenhangs Streudichte über Mischungsverhältnis wird im Kontext mit dem entsprechenden Teil im Punkt 5.2.6.2 erfolgen.

### 5.2.6.2 Bauteilversuche mit dem kleinen Gefach

Die Versuche zur Bestimmung des Setzungsverhaltens in einem Bauteil wurden mit 2- und 3-komponentigen Mischungen entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.3 durchgeführt. In einer ersten Versuchsreihe wurden die 2-komponentigen Materialmischungen A08, B08, C08, D08, A09, B09, C09 und D09 insgesamt drei Versuchsdurchgängen (Ablauf: siehe Tabelle 4-9) unterworfen. Die Soll-Startdichte des ersten Versuchsdurchgangs entspricht der Streudichte, wie diese in 5.2.6.1 ermittelt wurde. Die der folgenden zwei Versuchsreihen entspricht der Enddichte des vorhergegangenen Versuchs (Dichte nach Versuchsschritt 19, Tabelle 4-9).

In einer zweiten Versuchsreihe wurden für ausgewählte 2-komponentige Mischungen (A08, C08, D08, A09, C09, D09) drei weitere Versuchsdurchgänge mit der jeweils geringsten Soll-Startdichte aus der ersten Versuchsreihe durchgeführt, um die Wiederholgenauigkeit des Verfahrens zu prüfen. Diese Ergebnisse werden zusammen mit dem Ergebnis des ersten Versuchsdurchgangs der ersten Versuchsreihe statistisch zusammengeführt.

In einer dritten Versuchsreihe wurden für ausgewählte 3-komponentige Mischungen (E08, F08) jeweils vier Versuchsdurchgänge mit einer Soll-Startdichte, wie diese sich aus einem Versuch entsprechend der Bestimmung der Schüttdichte nach 4.2.1.4 mit Einstreuung von Hand ergibt, durchgeführt.

Mischungen zwischen FES H01 und Fichte Hobelspan H02 wurden nicht mit dem kleinen Gefach geprüft. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche befindet sich im Anhang 10.

Die Versuchsdurchführung ist verhältnismäßig aufwändig. So ist mit Vorbereitung, Einbau und Ausbau im Schnitt ein Versuch pro Tag möglich. Die Klimatisierung der Proben im Raumklima bis zur Massekonstanz und andere Unterbrechungen durch nötige Wartungs- bzw. Instandsetzungsarbeiten der durch den Prüfablauf stark beanspruchten Prüfeinrichtung, erhöhen den Zeitaufwand zusätzlich. Aus diesen Gründen zog sich die praktische Durchführung der Versuchsreihen von Mitte Februar 2009 bis Mitte Juni 2009 hin. Das Klima in diesem Zeitraum wurde in dem Labor mit einem Thermohygrographen aufgezeichnet. Zu Beginn der Messungen, Mitte Februar 2009, wurden gemittelt ca. 15°C und 50 % r. F. aufgezeichnet. Über den Durchführungszeitraum hinweg stieg die Temperatur relativ kontinuierlich auf ca. 20°C an und die Luftfeuchtigkeit erhöhte sich im Mittel auf etwa 60 % Mitte Juni 2009. Eine Abschätzung der Auswirkung dieser Klimaänderungen auf die Materialfeuchte liefert das zugehörige  $u_{gl}$  aus dem Keylwerth-Diagramm. Dieses steigt über den Versuchszeitraum von 9,4 % auf 11 %, was sich in einer Erhöhung der Ausgleichsfeuchten der Materialien widerspiegelt.

#### 5.2.6.2.1 *Vergleich des Belastungsniveaus der durchgeführten Schwingungs- und Fallversuche*

Bevor die Ergebnisse der Setzungsprüfungen dargestellt werden, wird das Belastungsniveau der einzelnen Versuchsschritte diskutiert. Für die Vibrationsbelastungen wird folgende Darstellung gewählt. In einer ersten Abbildung sind jeweils die maximalen Beschleunigungsamplituden jeder Einzelmessung über der Versuchslaufzeit (Abbildung 5-36; bei konstanter Anregung mit 73 Hz, vgl. Versuchsschritt 4; Tabelle 4-9) respektive der Anregungsfrequenz (Abbildung 5-42; bei den Frequenzrampen, vgl. Versuchsschritte 6 + 18; Tabelle 4-9) graphisch Linien dargestellt. In einer zweiten Abbildung sind jeweils die zugehörigen Frequenzen, ebenfalls aufgetragen über der Versuchslaufzeit (Abbildung 5-37) oder der Anregungsfrequenz (Abbildung 5-43), für jeden einzelnen Versuchsschritt dargestellt.

Die maximalen Beschleunigungen der Fallversuche (vgl. Versuchsschritt 10 + 12; Tabelle 4-9) werden ebenfalls ausgewertet (Tabelle 5-25).

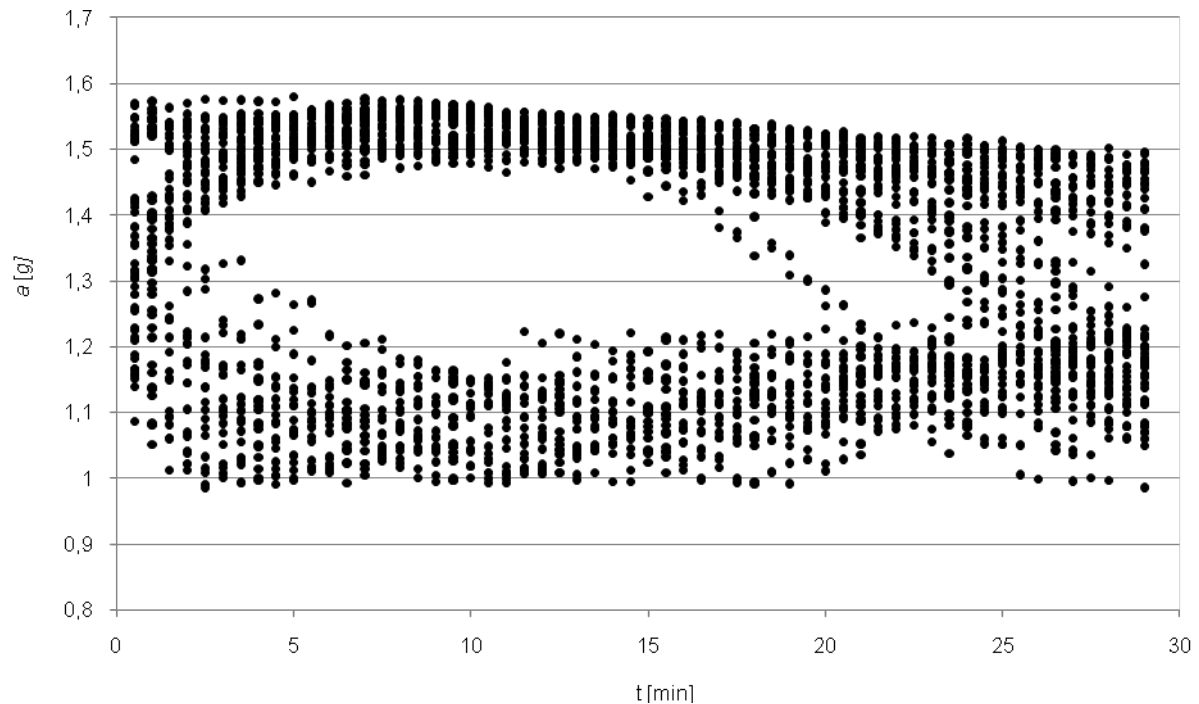


Abbildung 5-36 Verlauf der maximalen Beschleunigungsamplituden aus der Frequenzanalyse des Zeitsignals der Beschleunigung für die konstante Vibration (Versuchsschritt 4 - Tabelle 4-9) aufgenommen alle 30 s

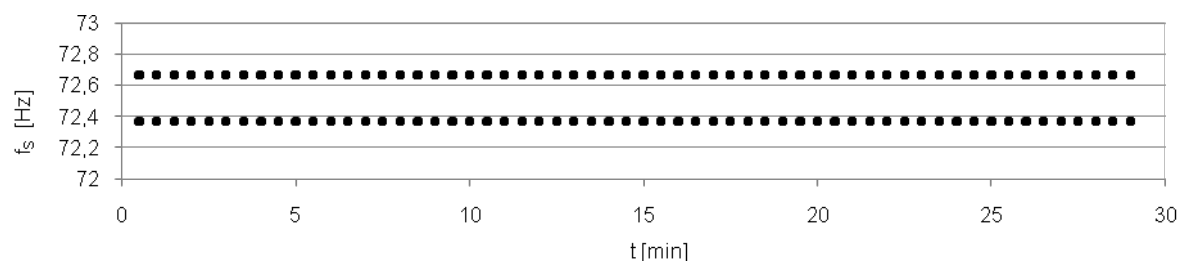


Abbildung 5-37 Verlauf der Frequenz der maximalen Beschleunigung aus Abbildung 5-36 aufgetragen über der Versuchslaufzeit für die Vibration mit konstanter Anregung von 73 Hz

Abbildung 5-37 zeigt, dass die am Gefach gemessene Frequenz der Anregung der Kreisrüttler von 73 Hz straff folgt. Die Antwortfrequenzen schwanken um einen Mittelwert von 72,5 Hz herum. Die leichte Abweichung nach unten lässt sich auf die Regelungscharakteristik des eingebauten Frequenzumwandlers zurückführen.

Größere Variationen ergeben sich bei den dieser Frequenz zugehörigen maximalen Beschleunigungen (Abbildung 5-36). Hier ist zu erkennen, dass bei ca. 40 % der Versuche kurz nach Versuchsbeginn die Beschleunigungen relativ stark abfallen und auf konstant niedrigerem Niveau (ca. 1,1 g) verharren. Bei einem Großteil der Versuche (ca. 60 %) werden bis etwa zur Hälfte der Versuchslaufdauer Beschleunigungen von ca. 1,5 g gemessen, danach werden die gemessenen Beschleunigungsamplituden kleiner. Die kleineren Amplituden der Beschleunigungen über der Grundfrequenz zeigen sich auch im Zeitsignal und sind nicht auf ein von Überlagerungen geprägtes Frequenzspektrum zurückzuführen. Neben der Grundfrequenz existieren im analysierten Bereich zwar leichte Überlagerungen bei höheren Frequenzen (Abbildung 5-38), die Amplituden über der

Grundfrequenz werden davon aber nicht wesentlich beeinflusst. Diese Übersicht über das Schwingungsverhalten des Prüfaufbaus ist exemplarisch für alle Versuche, die mit konstanter Beschleunigung durchgeführt wurden.

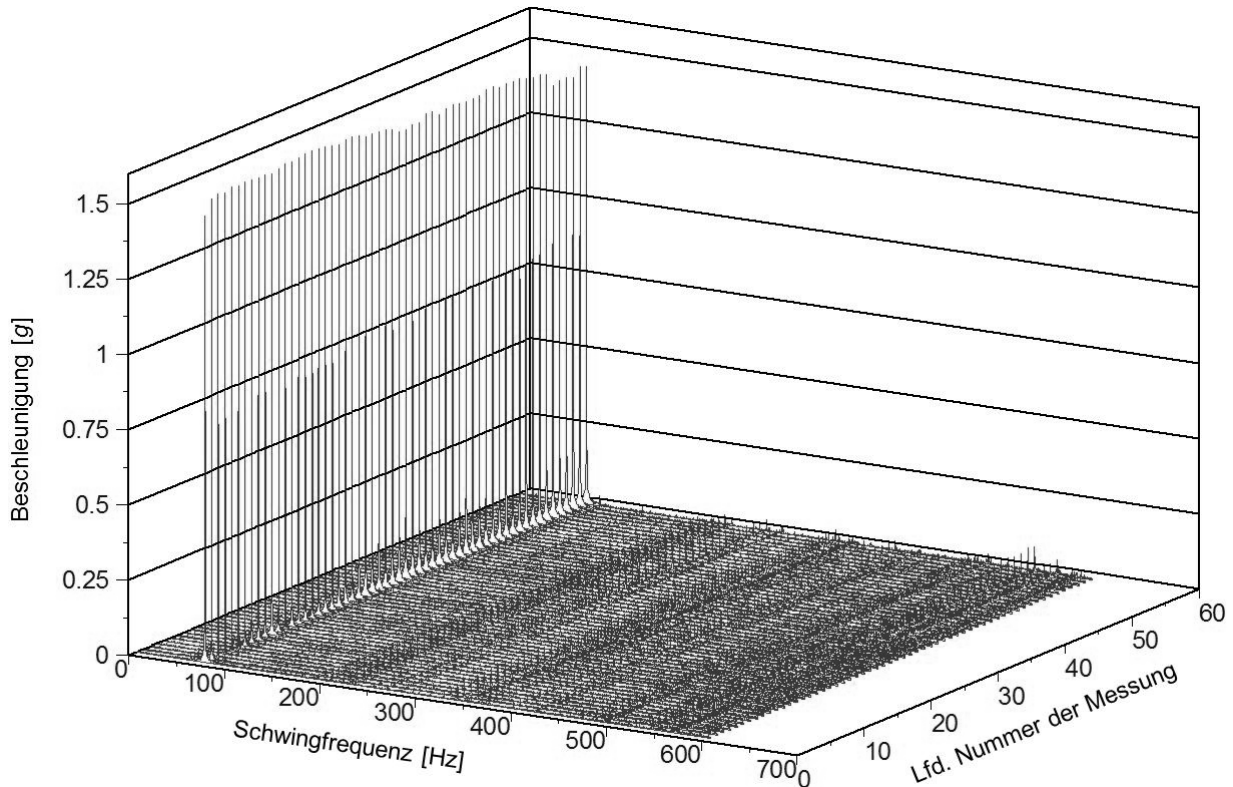


Abbildung 5-38 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch D09-KG-19-01-1 (konstante Vibration)

Für das Verhalten der mit zunehmender Versuchslaufdauer abnehmenden Maximalbeschleunigungen lassen sich mehrere Erklärungsmodelle ableiten.

Während des Betriebs erfolgt zentral über den Motoren eine verhältnismäßig starke Erwärmung des Rüttelrostes. Diese Temperaturerhöhung wird in erster Linie durch die Abwärme der rotierenden Kreisrüttler verursacht. Mit steigender Temperatur kommt es zu einer leichten Veränderung der elastischen Eigenschaften der Schraubverbindung zwischen Kreisrüttler und Rüttelrost oder auch der verwendeten Stahl-T-Träger. Wird die Konstruktion weicher, könnte die Dämpfung des Systems durch einen verstärkten Abbau der Energie in Verformungsarbeit größer werden. Es würde dann mehr Schwingungsenergie absorbiert werden als im kalten Zustand. Diese These wird von der Beobachtung gestützt, dass die Versuche, bei denen der Leistungsabfall, wie beschrieben, bereits zu Beginn des Versuchs eintritt direkt im Anschluss an einen vorhergehenden Versuch durchgeführt wurden. Der Rüttelrost war hier also schon mehr oder weniger stark erwärmt. Auch durch eine genauere Betrachtung der Übertragungsfunktionen eines Einzelversuchs wird die Vermutung gestützt, dass die Dämpfung des Tisches im Laufe der Vibrationsbeanspruchung größer wird.



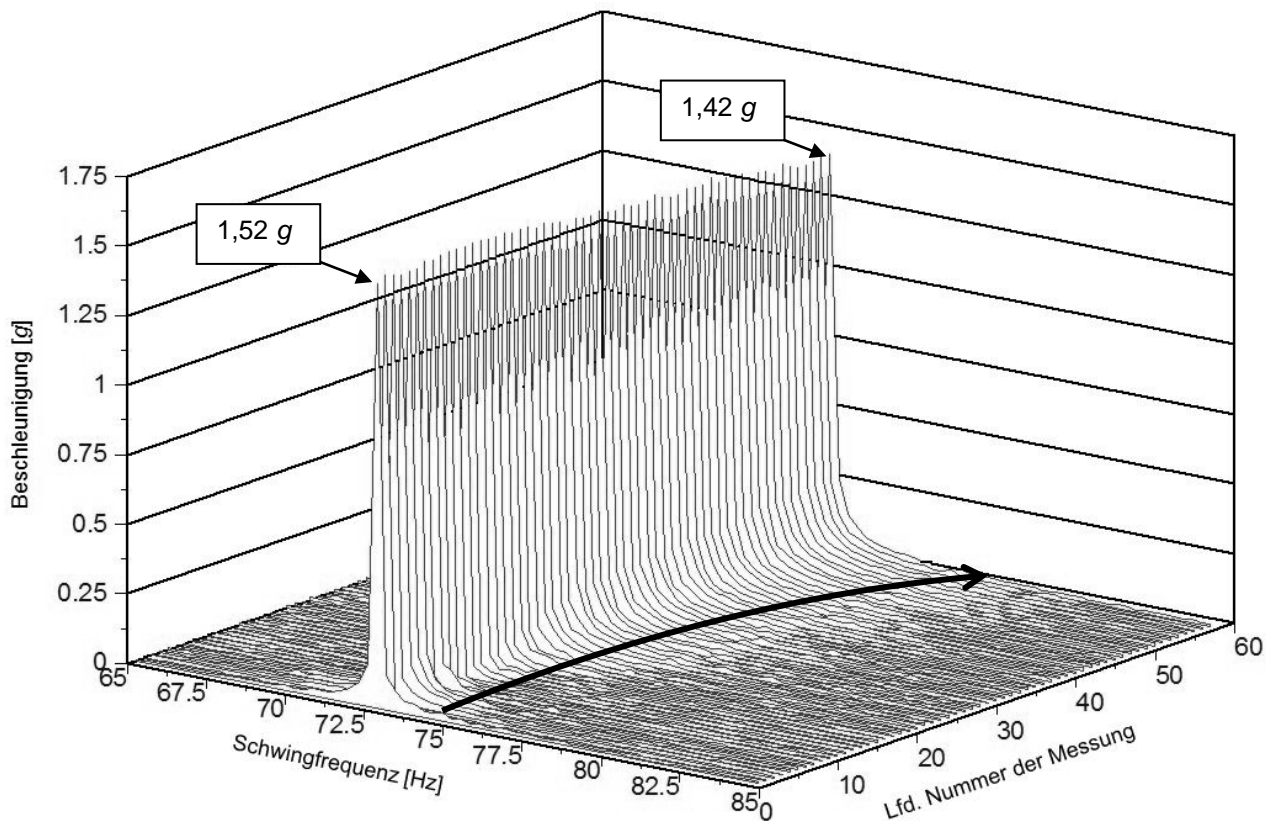


Abbildung 5-39 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch A09-KG-32-01-1 (konstante Vibration)

In Abbildung 5-39 ist das Wasserfalldiagramm mit den Übertragungsfunktionen der Grundfrequenz des Versuchs A09-KG-32-01 über der Schwingfrequenz vergrößert dargestellt. Man kann qualitativ erkennen, dass mit längerer Versuchslaufzeit (Versuchsstart: Messung 1; Versuchsende: Messung 58; Abstand: je 30 s) die Übertragungsfunktion breiter wird. Parallel dazu sinkt der Maximalpeak der Amplitude von anfangs 1,52 g auf 1,42 g ab.

Abbildung 5-40 zeigt die Übertragungsfunktionen der Schwingungsmessungen aus dem Versuch A09-KG-32-04-1. Die Beladung des Prüfgefachs ist hier identisch mit den Verhältnissen im Versuch A09-KG-32-01-1 (gleiche Startdichte, gleiche Materialvariante). Trotzdem unterscheidet sich das Schwingungsverhalten deutlich. Im Vergleich mit Abbildung 5-39 ist festzustellen, dass die Übertragungsfunktionen von Anfang an breiter ausfallen und durchgängig niedrigere Maximalwerte der Beschleunigung gemessen werden.

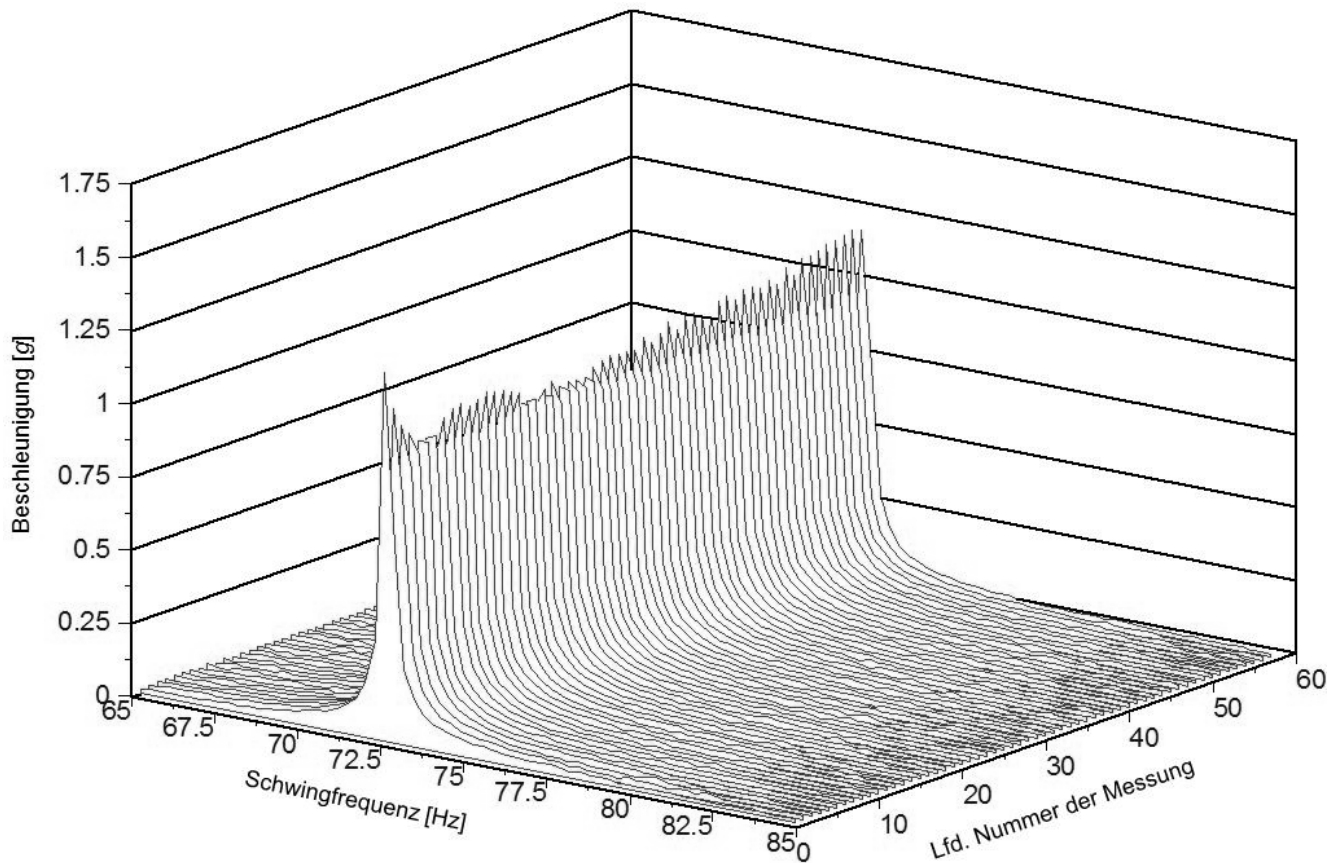


Abbildung 5-40 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuch A09-KG-32-04-1 (konstante Vibration)

Um die Dämpfung der Hauptschwingung beurteilen zu können, kann die Halbwertsbreite der Übertragungsfunktion verglichen werden. In Abbildung 5-41 ist jeweils der erste und letzte Peak aus Abbildung 5-39 und Abbildung 5-40 vergrößert gegenübergestellt.

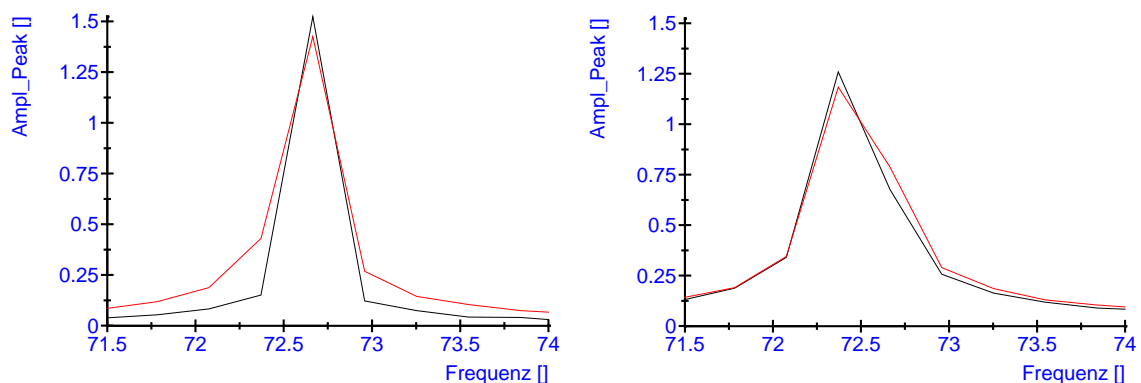


Abbildung 5-41 Übertragungsfunktion der jeweils ersten Messung (schwarze Linie) und letzten Messung (rote Linie) aus den Versuchen A09-KG-32-01-1 (linke Abbildung) und A09-KG-32-04-1 (rechte Abbildung)

Vergleicht man qualitativ die Halbwertsbreite der Übertragungsfunktion der ersten Messung (schwarze Linie) mit der letzten Messung (rote Linie), so lässt sich erkennen, dass in beiden Versuchen die Dämpfung von der ersten zur letzten Messung hin leicht zunimmt.

Eine andere Erklärung für die unterschiedlichen maximalen Beschleunigungsamplituden und die variierende Dämpfung findet sich in dem Prinzip der Anregung durch die Kreisrüttler. Die umlaufenden

Unwuchten lassen sich als Kraftvektoren darstellen, welche sich in vertikaler Richtung addieren, in horizontaler Richtung jedoch aufheben (Abbildung 4-40). Durch die Kreisbewegung ergibt sich eine sinusförmige, einachsige Schwingung. Wenn nun die Synchronität des Umlaufs der beiden Unwuchterreger gestört wird, verringert sich die resultierende anregende Kraft entsprechend der zeitlichen Verschiebung des Umlaufs untereinander. Eine Störung der Synchronität des Umlaufs kann dabei unterschiedliche Ursachen haben. Einerseits können unterschiedliche Lagerreibungen den Lauf beeinflussen, andererseits beeinflussen sich die Motoren gegenseitig. Des Weiteren besteht auch eine Rückkopplung mit der erzeugten Schwingung des Rütteltisches samt Bauteilaufsatz.

Für die Beurteilung der Auswirkung unterschiedlicher Schwingungsintensitäten auf die Setzung der geprüften Materialien sollen im Folgenden exemplarisch die Versuche A09-KG-32-01 / -04 / -05 und -06 miteinander verglichen werden. Bei diesen vier Versuchen sind die geprüfte Materialmischung und die Startdichte identisch. Die Schwingungscharakteristik der Versuche A09-KG-32-01 und -05 entspricht dem Sollwert von 1,5 g bei Anregung mit 73 Hz (vgl. exemplarisch: Abbildung 5-39), die der Versuche A09-KG-32-04 und -06 zeigt deutlich reduzierte Maximalwerte der Beschleunigung bei Anregung mit 73 Hz (vgl. exemplarisch: Abbildung 5-40). In Tabelle 5-23 sind die Setzungsdichten nach der Einbringung sowie nach dem 1. Versuchsschritt mit konstanter Beschleunigung dargestellt. Es zeigt sich kein ausgeprägter Einfluss der vergleichsweise höheren Belastung bei den Versuchen A09-KG-32-01 und A09-KG-32-05 gegenüber den niedrigeren Beschleunigungswerten bei den Versuchen A09-KG-32-04 und A09-KG-32-06.

Tabelle 5-23 Setzungsdichte nach Versuchen mit unterschiedlichem Schwingungsverhalten

Versuchsnr.:	A09-32-01	A09-32-04	A09-32-05	A09-32-06
Materialfeuchte:	6,5 %	6,2 %	5,8 %	6,2 %
Soll-Einbringdichte:	32,0	32,0	32,0	32,0
Dichte nach:				
Einbringung	34,1	33,6	33,5	33,2
Konst. Vibration	43,1	43,8	44,1	44,2

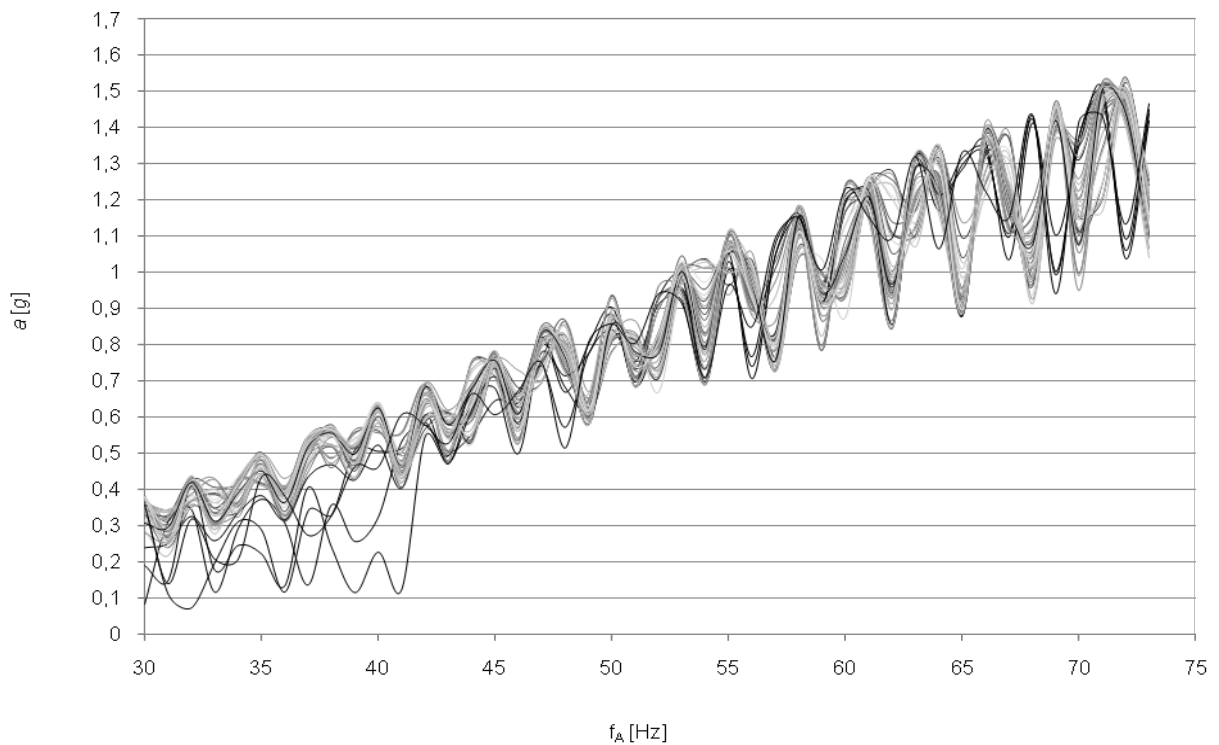


Abbildung 5-42 Maximale Beschleunigungsamplituden aus der Frequenzanalyse des Zeitsignals der Beschleunigung für die Vibration aus den Frequenzrampen (Versuchsschritte 6 + 18 - Tabelle 4-9), aufgenommen jeweils 15 s nach Frequenzwechsel (interpolierte Linien zur Verbesserung der Lesbarkeit)

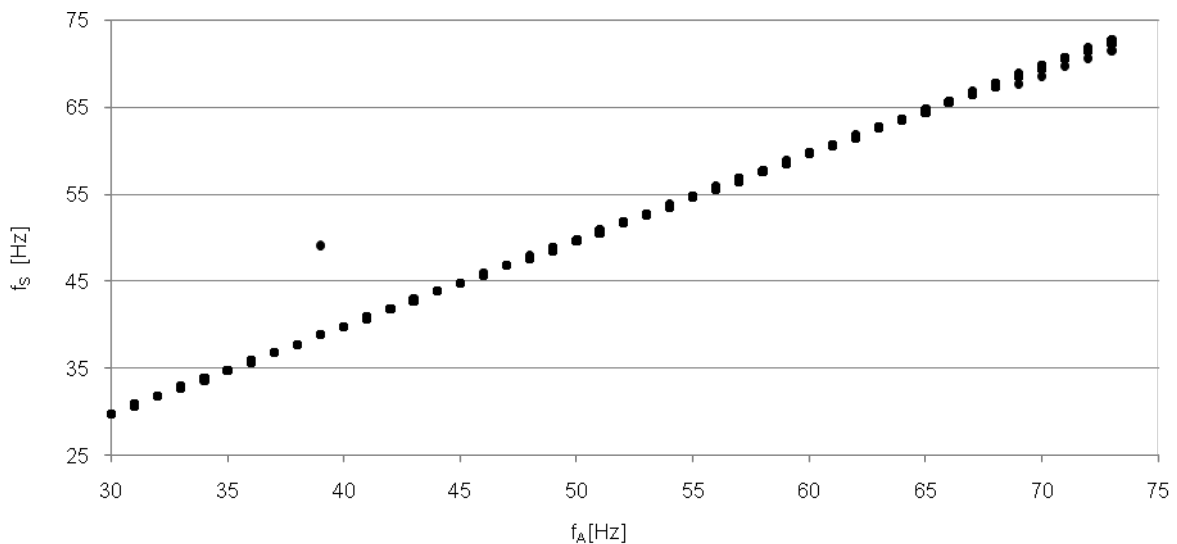


Abbildung 5-43 Frequenz der maximalen Beschleunigung aus Abbildung 5-42 (Schwingfrequenz) aufgetragen über der Anregungsfrequenz der Frequenzrampe

In Abbildung 5-42 sind die maximalen Beschleunigungsamplituden der Vibrationsbeanspruchung während der Frequenzrampen, aufgenommen jeweils in der Mitte der Laufzeit einer Frequenzstufe, dargestellt. Auffällig ist der ausgeprägte wellige Verlauf der Beschleunigungswerte. Eine kontinuierliche Erhöhung der Frequenz führt bei allen Versuchen in einem regelmäßigen Muster zunächst erwartungsgemäß zu einer Erhöhung der Beschleunigung. Bei weiterer Frequenzerhöhung treten jedoch wieder niedrigere Werte auf, bis die Beschleunigungen schließlich wieder steigen.

Dieses Muster wiederholt sich mehr oder minder regelmäßig. Der Abstand der Frequenzen, bei denen lokale Minima oder Maxima auszumachen sind, ist über den durchfahrenen Frequenzbereich relativ konstant. Im Mittel findet sich im Abstand von ca. 3 Hz das jeweils nächste lokale Maximum. Die Schwankungsbreiten der Beschleunigungswerte werden mit höheren Beschleunigungen größer. Der Maximalpeak der Beschleunigungen liegt zudem nicht bei der Anregung mit 73 Hz, sondern im Mittel aller durchgeführten Messungen bei 72 Hz Anregungsfrequenz (Tabelle 5-24).

Tabelle 5-24 Histogramm der maximalen Beschleunigungen der Vibrationsbeanspruchung aus der Frequenzrampe (alle Versuche) zwischen 70 Hz und 73 Hz Anregungsfrequenz

$g_{\max}$ [g]	70 Hz	71 Hz	72 Hz	73 Hz
Klasse	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit	Häufigkeit
1	5	0	0	0
1,1	17	2	3	13
1,2	36	13	3	49
1,3	22	11	1	28
1,4	17	6	1	4
1,5	4	33	67	7
und größer	0	36	26	0

Wie in Tabelle 5-24 zu erkennen, liegt bei 73 Hz Anregungsfrequenz der Großteil der gemessenen Beschleunigungen zwischen 1,1 g – 1,3 g.

In Abbildung 5-43 sind die Frequenzen der maximalen Beschleunigungen aus Abbildung 5-42 dargestellt. Abgesehen von zwei Ausreißern ist zu erkennen, dass das System auch während der Frequenzhochläufe der anregenden Frequenz streng folgt. Diesem Eindruck folgt auch die Schwingungscharakteristik der Hochläufe (exemplarisch Abbildung 5-44).

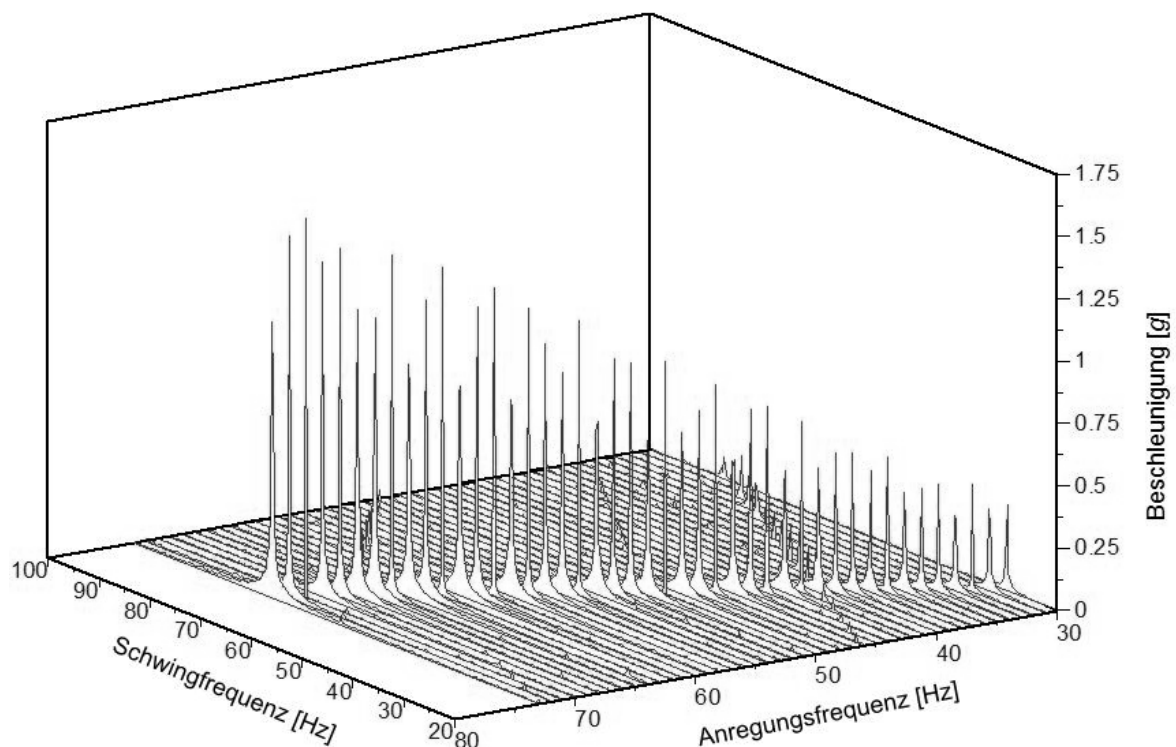


Abbildung 5-44 Fouriertransformierte Beschleunigungsmessungen in der Darstellung als Wasserfalldiagramm für den Versuchsschritt A09-KG-32-01-2 (1. Vibrationshochlauf)

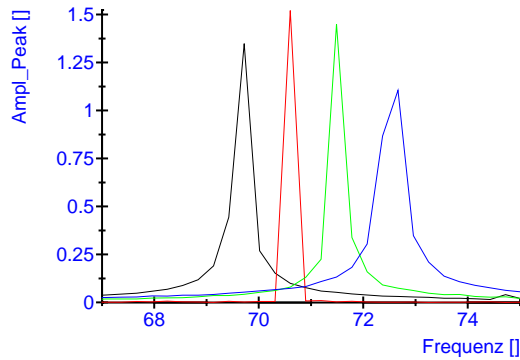


Abbildung 5-45 Übertragungsfunktion der letzten vier Beschleunigungsmessungen aus dem Versuch A09-KG-32-01-2

Der Diskussion bei der konstanten Vibration entsprechend, lässt sich in Abbildung 5-44 und Abbildung 5-45 wieder erkennen, dass die lokal betrachtet relativ niedrigeren Beschleunigungswerte (lokale Minima) eine breitere Übertragungsfunktion aufweisen als die relativ höheren Beschleunigungswerte. Der Effekt ist bei praktisch allen Versuchen von Anfang der Versuchslaufzeit an deutlich zu erkennen. Da eine Erklärung variierender Dämpfung durch unterschiedliche Temperaturen in diesem Zusammenhang auszuschließen ist, könnte hier vor allem eine Asynchronität des Umlaufs der rotierenden Unwuchtmassen sowie Beeinflussungen durch die Schwingung des Rütteltisches mitsamt den Aufbauten für den beobachteten Effekt verantwortlich sein.

Allgemein bleibt einschränkend folgendes anzumerken. Der Prüfaufbau, bestehend aus Rüttelrost und eingespanntem Gefach, ist ein komplexes schwingungsfähiges System, das je nach Belastungssituation (Anregung) und Beladung (Befüllung und Verspannung des Gefachs) an den verschiedenen Elementen unterschiedliche Eigenfrequenzen aufweist. Eine Beeinflussung des Systems durch Resonanzen an den Bauteilen, speziell dem Gefach, ist nicht auszuschließen und schwierig zu kontrollieren. Die gemessene Beschleunigung gilt nur für die gewählte Messstelle direkt auf der Grundplatte des Gefachs zentral über den Kreisrüttlern. An anderen Stellen gemessen, wird sich der Verlauf der Beschleunigung vermutlich anders verhalten. Für das Mittel der Messungen kann trotzdem eine reproduzierbare Schwingungbelastung unterstellt werden.

Auch bei den Fallversuchen zeigt sich eine verhältnismäßig hohe Variation der maximalen Beschleunigungswerte sowohl innerhalb einer Versuchsreihe als auch über die unterschiedlichen Versuche hinweg. In Tabelle 5-25 ist die Häufigkeit aller Beschleunigungswerte aus den Fallversuchen dargestellt. Über 70 % der 489 aufgenommenen und ausgewerteten Beschleunigungen weisen Maximalpeaks von 300 g - 500 g auf. Einschränkend muss vermerkt werden, dass Beschleunigungen über 500 g den Maximalwert des Beschleunigungsaufnehmers überschreiten. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass noch höhere Beschleunigungen aufgetreten sind, die messtechnisch aber nicht mehr erfasst werden konnten und deshalb in die Gruppe bis 500 g eingeordnet worden sind.

Tabelle 5-25 Histogramm der Beschleunigungen aus den Fallversuchen, Versuchsschritt 10 + 12;  
Tabelle 4-9

Klasse [g]	Häufigkeit	Häufigkeit in %
100	6	1 %
200	34	7 %
300	98	20 %
400	101	21 %
500	250	51 %
und größer	0	
Summe	489	100 %

Um auch bei den Fallversuchen die Auswirkung unterschiedlicher Beschleunigungen auf die Messergebnisse der Setzungsdichten darzustellen, sind in Tabelle 5-26 die Dichten nach den einzelnen Fallversuchen den gemessenen Beschleunigungen gegenübergestellt. Im Versuch A09-KG-32-01 ist ein eher niedriges Niveau der gemessenen Beschleunigungen beim Aufprall auf dem Betonboden festzustellen. Der Versuch A09-KG-32-05 weist durchgängig höhere Beschleunigungsspitzen auf. Trotzdem ist das Niveau der Setzung bei beiden Versuchen nahezu identisch.

Tabelle 5-26 Setzungsdichte und gemessene Maximalbeschleunigungen der Fallversuche für die Versuche A09-KG-32-01 und A09-KG-32-05

Versuchsnr.:	A09-32-01		A09-32-05	
Materialfeuchte:	6,5 %		5,8 %	
Soll-Einbringdichte:	32,0 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>		32,0 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
	Dichte [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	Beschl. [g]	Dichte [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	Beschl. [g]
Einbringung	34,1	-	33,5	-
Konst. Vibration	43,1	-	44,1	-
1. Vibr. Hochlauf	43,8	-	44,8	-
1. Fallversuch	44,5	255	45,6	310
2. Fallversuch	45,2	222	46,2	500
3. Fallversuch	45,8	254	46,8	487
4. Fallversuch	46,1	33	47,4	500
5. Fallversuch	46,7	500	47,7	500
6. Fallversuch	47,1	403	48,3	360
7. Fallversuch	47,4	44	48,7	378
8. Fallversuch	47,9	417	49,1	403
9. Fallversuch	48,2	463	49,3	445
10. Fallversuch	48,7	446	49,5	378
2. Vibr. Hochlauf	48,6	-	49,4	-

Um gleichmäßig hohe Beschleunigungswerte zu erzielen, ist es essenziell, die Führung des Prüfgefaches während des Falls zu optimieren. Bereits ein geringfügiges Verkanten beim Aufprall führt dazu, dass sich der Kraftstoß auf das Gefach in Verformungen der Konstruktion abbaut, was zu geringeren Maximalbeschleunigungen führt.

Die detaillierten Ergebnisse der Setzungsversuche mit dem kleinen Gefach finden sich in Anhang 10. Im Folgenden sind ausgewählte Ergebnisse aufbereitet und im Kontext diskutiert.

### 5.2.6.2.2 *Prozentuale Dichteerhöhung während des Versuchs, bezogen auf die erreichte Setzungsdichte*

Um darzustellen, welchen Anteil an der Setzungsdichte nach Versuchsende die einzelnen Versuchsschritte liefern, ist in Abbildung 5-46 der über die jeweils vorhergehenden Versuchsschritte kumulierte prozentuale Anteil der Dichteerhöhung nach dem jeweiligen Versuchsschritt aufgetragen.

Bei einer Startdichte nahe der Streudichte werden ca. 60 % - 70 % der Setzungsdichte nach Versuchsende bereits nach der ersten Vibrationsbeanspruchung erreicht. Mit höheren Einbringdichten verliert die einleitende Vibrationsbeanspruchung für das messbare Setzungsergebnis, d. h. die mittlere Dichteerhöhung, jedoch an Bedeutung und es überwiegt der Einfluss der Fallversuche.

Da die Dichte nach der letzten Vibrationsbeanspruchung als Setzungsdichte des Versuchs mit 100 % angesetzt wird, erreichen bei den Versuchen mit höheren Startdichten alle Mischungen mit Faserstoff sowie die Mischung D09 während des Versuchs Setzungsdichten > 100 %. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die letzte Vibrationsbeanspruchung bei diesen Versuchen wieder zu einer Auflockerung des Materials im Prüfgfach führt. Bei den Mischungen mit Faserstoff A08, C08 und D08 wird unabhängig vom Mischungsverhältnis beim letzten Fallversuch immer prozentual in etwa die gleiche Überhöhung der Setzungsdichte, bezogen auf den Wert nach der letzten Vibrationsbeanspruchung, erreicht. Unterschiedlich ist aber der Verlauf der Werte. Während bei der Mischung A08 der Anstieg der Werte zwischen dem ersten und letzten Fallversuch bei höheren Startdichten relativ linear verläuft, lässt sich mit steigendem Anteil an FES (C08, D08) zu Beginn ein steilerer Verlauf feststellen. Die ersten Fallversuche haben also eine größere Auswirkung auf die Setzungsdichte. Dementsprechend wird bei diesen Versuchen aber auch mit steigender Anzahl der durchgeführten Fallversuche die Bedeutung des einzelnen Fallversuchs für die gesamte Setzung geringer.

Bei den Mischungen mit Altpapierflocken A09, C09 und D09 ist die während der Fallversuche eintretende Verdichtung über den Wert nach der letzten Vibrationsbeanspruchung erst bei der Mischung D09, die den höchsten Anteil an FES aufweist, zu beobachten. Die 3-komponentigen Mischungen E08 und F08 wurden nur mit einer Startdichte nahe der Streudichte geprüft und zeigen über die Versuchsschritte hinweg ein ähnliches Verdichtungsverhalten wie die geprüften 2-komponentigen Mischungen bei geringster Startdichte. Festzuhalten bleibt, dass bei allen untersuchten Mischungen auch bei höheren Startdichten nach 10 Fallversuchen kein Grenzwert der Setzungsdichte erreicht wurde. Jeder Fallversuch führte zu einer weiteren Verdichtung des Materials.



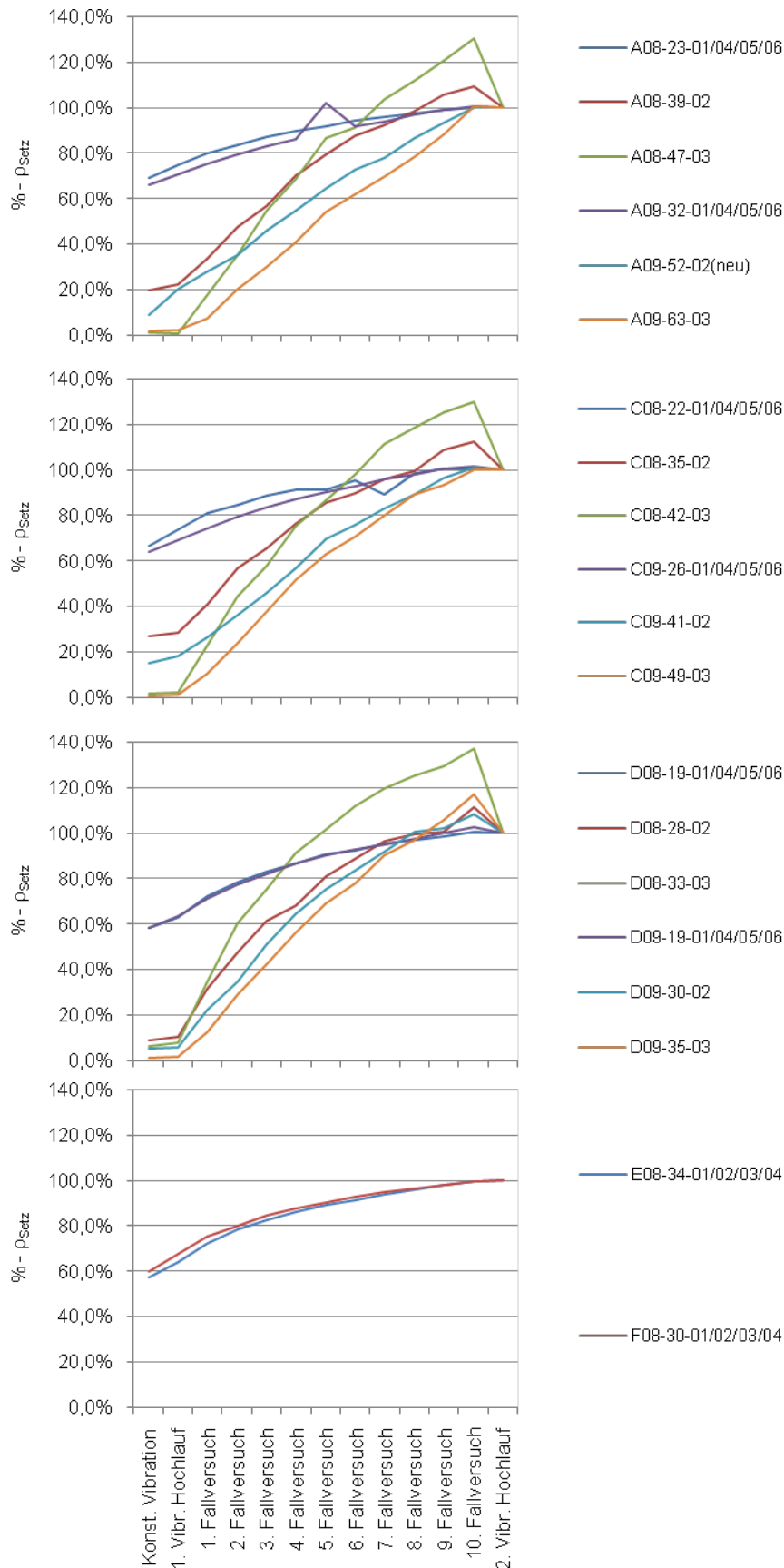


Abbildung 5-46 prozentuale Erhöhung (kumulierte Darstellung) der Dichte während der Bauteilversuche, sortiert nach Mischungsansätzen (A\*\*; C\*\*; D\*\*; E\*\*; F\*\*)

### 5.2.6.2.3 Dichteprofil über der erreichten Setzungshöhe

Wie in 4.2.2.3 beschrieben, wurde nach jedem Versuch die erreichte Setzungshöhe gedrittelt, das Material wurde vorsichtig entnommen und einzeln ausgewogen. Hieraus lässt sich ein Dichteprofil über der Höhe der Materialsäule nach der Verdichtung durch die Vibrations- und Fallversuche ableiten. Die Wiederholgenauigkeit des Verfahrens ist gut. Die Dichteprofile der vier bei gleicher Startdichte durchgeführten Setzungsversuche (2-komponentige: \*\*-01/04/05/06; 3-komponentige: \*\*-01/02/03/04) weisen zwischen den Einzelversuchen innerhalb einer Höhenstufe Variationskoeffizienten zwischen 0,9 % - 6,6 %, im Mittel 2,7 %, auf.

In Abbildung 5-47 sind die ermittelten Dichteprofile (siehe Anhang 10) über der auf 100 % normierten Setzungshöhe dargestellt. Die durch Linien verbundenen Datenpunkte repräsentieren dabei die mittlere Dichte der abgeteilten Drittel und sind jeweils in der Mitte eines Drittels aufgetragen. In jeweils einem Diagramm sind die Werte vergleichbarer Mischungsansätze (\*09 und \*08) gegenübergestellt. Zur besseren Unterscheidung sind die Werte der Mischungen mit Faserstoff durch gestrichelte Linien dargestellt.

Herausgestellt werden soll im Folgenden die Entwicklung der Dichtedifferenz zwischen oberem und unterem Drittel im Zusammenhang mit der relativen Dichteerhöhung durch die Setzungsversuche und dem Mischungsverhältnis der Materialvariante. Diese Werte sind in Tabelle 5-27 für die Setzungsversuche mit der geringsten Startdichte gegenübergestellt.

Tabelle 5-27 Mischungsverhältnis (Anteil H01), relative Dichteerhöhung und Differenz der Dichte zwischen oberem und unterem Drittel (Oben – Unten)

Versuchsnummer	MV [%]	rel. Dichteerhöhung [%]	Oben – Unten [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]
A08-23-01/04/05/06	13,6	49,5	8,3
B08-21-01	23,1	39,8	3,3
C08-22-01/04/05/06	33,9	41,7	7,6
D08-19-01/04/05/06	74,6	31,4	5,3
E08-34-01/02/03/04	19,0	33,3	9,9
F08-30-01/02/03/04	15,4	34,9	10,0
A09-32-01/04/05/06	13,3	45,7	16,4
B09-27-01	22,7	38,6	14,8
C09-26-01/04/05/06	33,5	39,5	11,0
D09-19-01/04/05/06	65,9	39,5	5,0

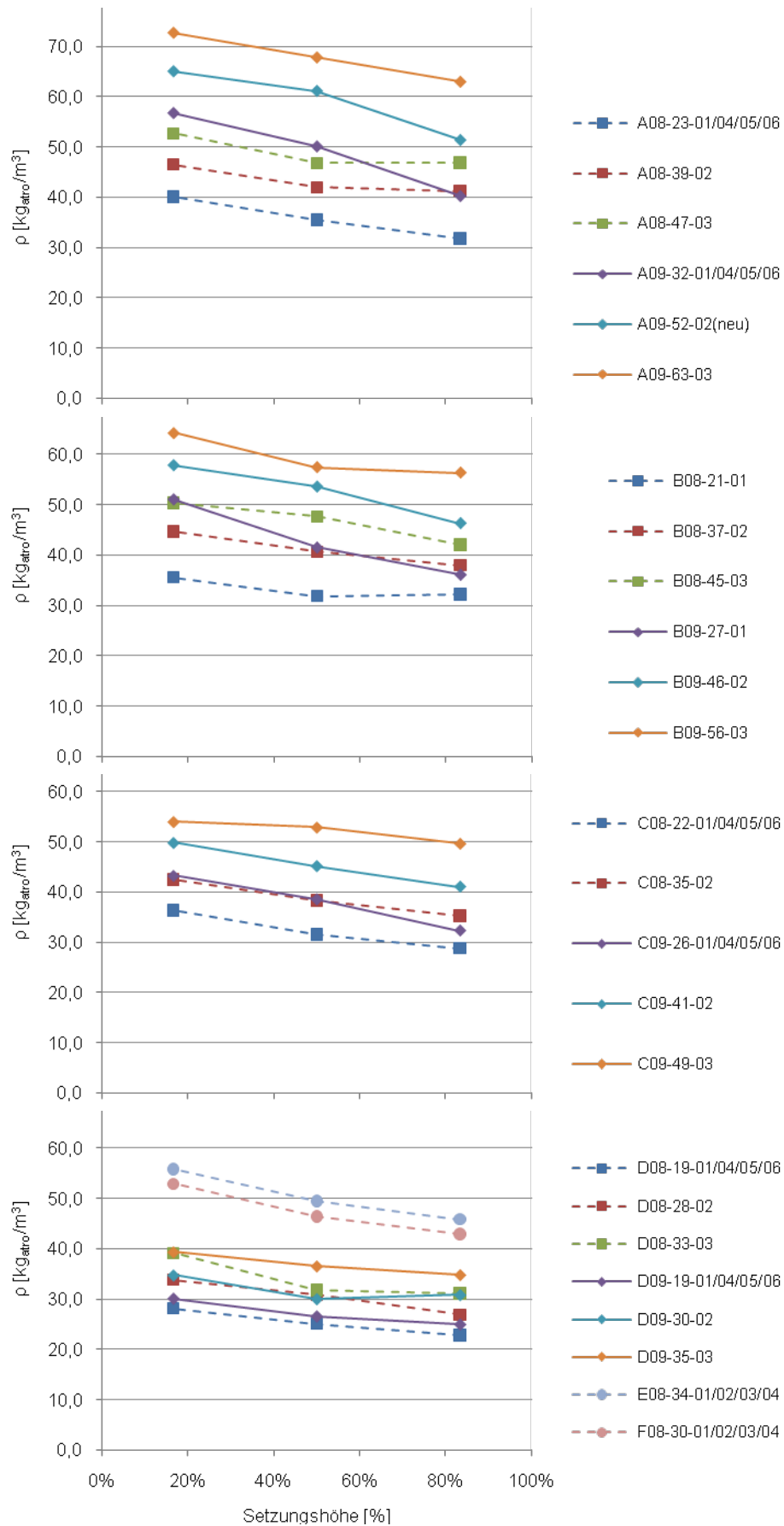


Abbildung 5-47 Dichteprofil; 0 % Höhe = Gefachboden; 100 % Höhe = Setzungshöhe

Bei geringen Anteilen an FES weisen die geprüften Mischungen mit Altpapierflocken über der Setzungshöhe im Prüfgefach insgesamt eine größere Differenz der Dichte zwischen oberem und unterem Drittel auf als die äquivalenten Mischungsverhältnisse mit Faserstoff. Bei höheren Startdichten und höheren Anteilen an FES werden diese Unterschiede geringer. Dies lässt sich vermutlich auf die gegenüber den Mischungen mit Altpapierflocken geringere Differenz der Streudichte und damit auch der Setzungsdichte der Einzelmaterialien zurückführen. Die Streudichtedifferenz der Materialien Faserstoff H08 und FES H01 beträgt  $9,9 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ , zwischen Altpapierflocken H09 und FES H01 ergibt sich eine Differenz von  $23,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ . Entsprechend größer ist bei den Mischungen mit Altpapierflocken der Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die Streudichte der Materialvariante. Bei der gewählten Bauteiltiefe von 0,16 m und einer Breite von 0,625 m lasten bei einem fiktiven Mischungsverhältnis von 50 % FES, bezogen auf das schwerere Einzelmaterial, bei einer Variante mit Altpapierflocken  $1,155 \text{ kg}/\text{m}_{\text{Gefachhöhe}}$  weniger Last auf der untersten mit Partikeln belegten Fläche. Bei einer Variante mit Faserstoff wäre die Entlastung, also die Differenz zum Faserstoff als Einzelmaterial, nur  $0,495 \text{ kg}/\text{m}_{\text{Gefachhöhe}}$ .

Tabelle 5-28 Korrelationen zwischen: Anteil FES H01, relativer Dichteerhöhung durch den Versuch, Differenz der Dichte zwischen oberem und unterem Drittel (für Versuche mit Startdichte = Streudichte)

A08 - D08	A09 - D09	Anteil H01 [%]		rel. Dichteerhöhung [%]		oben - unten [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]	
Anteil H01 [%]	1,00	1,00	-0,91	-0,52	-0,25	-0,99	
rel. Dichteerhöhung [%]	-	-	1,00	1,00	0,60	0,52	
oben - unten [ $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ]	-	-	-	-	1,00	1,00	

In Tabelle 5-28 wurde jeweils innerhalb der Versuche mit der geringsten Startdichte, aber über die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse hinweg, also A08-23-01/04/05/06, B08-21-01, C08-22-01/04/05/06, D08-19-01/04/05/06 (bei Mischungen mit Faserstoff) sowie A09-32-01/04/05/06, B09-27-01, D09-19-01/04/05/06 und C09-26-01/04/05/06 (bei Mischungen mit Altpapierflocken) korreliert. Ein steigender Anteil an FES bewirkt bei den Mischungen mit Altpapierflocken (A09 – D09) eine geringere Dichtedifferenz, die sich, wie beschrieben, vermutlich auf die Entlastung durch das Eigengewicht des aufliegenden Materials zurückführen lässt. Der Zusammenhang ist mit einem Korrelationskoeffizienten nahe - 1,0 sehr gut bestimmt. Die Korrelation des Anteils an FES zur relativen Dichteerhöhung ist vergleichsweise schwächer ausgeprägt. Bei den untersuchten Mischungen mit Faserstoff lässt sich ein gut bestimmter Zusammenhang zwischen der relativen Dichteerhöhung, also der Komprimierung des Materials und dem Anteil an FES feststellen. Die Korrelation des Anteils an FES zur Differenz der Dichte ist schwach. Der Zusammenhang zwischen der relativen Dichteerhöhung und der Differenz der Dichte ist ähnlich dem der Mischungen mit Altpapierflocken.

Entscheidend für die Ausbildung eines Dichteprofiles ist neben der relativen Dichteerhöhung, also dem Verdichtungsweg, also vor allem die Dichte des Materials und daraus folgend die Belastung der unteren Materialschichten durch das darüber liegende Eigengewicht.

Die weiterführende Betrachtung beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit sich das Dichteprofil auf das Ergebnis der Setzungsprüfung auswirken könnte, da eine ungleiche Dichteverteilung über der Höhe des Gefachs zu einem nicht linearen Verlauf des Flächengewichts [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] über der Materialhöhe führt und ob sich ein gezielt eingebrachtes Dichteprofil über der Bauteilhöhe positiv auf die Setzung auswirken könnte. Das ausgeprägteste Dichteprofil über der Setzungshöhe zeigt sich bei den Versuchen A09-32-01/04/05/06, weshalb die dort gemessenen und gemittelten Werte der Dichte in den abgeteilten Dritteln als Beispiel für die weiteren Überlegungen verwendet werden. Die gemittelte lokale Dichte im oberen, mittleren und unteren Drittel ist in Abbildung 5-47 normiert auf 100 %

Setzungshöhe aufgetragen. Für die folgenden Überlegungen werden diese 100 % Setzungshöhe auf 1 m Gefachhöhe übertragen. Aus den so skalierten Datenpunkten wird für die Versuche A09-32-01/04/05/06 eine lineare Regression durchgeführt, aus der unter der vereinfachenden Voraussetzung eines von der obersten bis zur untersten Materialschicht linear verlaufenden Dichteprofils die maximale und minimale Dichte der infinitesimal klein gedachten obersten und untersten Schicht im Bauteil berechnet werden kann.

Das weitere Verständnis der Zusammenhänge wird erleichtert, wenn man eine graphische Darstellung wie folgt aufbaut. Den Ursprung der Abszisse stellt die oberste Materialschicht, entspricht 100 % Setzungshöhe in Abbildung 5-47, dar. Mit aufsteigenden Werten auf der x-Achse dringt man gedanklich in die Tiefe der Materialsäule im Gefach ein und erreicht nach 1 m schließlich den Boden des Bauteils. In dieser Schicht findet man die größte Materialdichte. Die aus Abbildung 5-47 gewonnene Regressionsgerade muss hierfür also noch um ihren Mittelwert, dieser entspricht der mittleren Setzungsdichte, herum gespiegelt werden. Tabelle 5-29 zeigt die Regressionsparameter der Funktionen.

Tabelle 5-29 Regressionsparameter RGP A09-32 lineares Dichteprofil und am Mittelwert gespiegelte Funktion sowie Konstante für die Funktion homogenes Dichteprofil

		$\rho(d) = a_2 \cdot d^2 + a_1 \cdot d + a_0$			
Nr.	RGP	$a_2$	$a_1$	$a_0$	$R^2$
X	RGP A09-32 lineares Dichteprofil	0	-24,6717	61,3273	0,99
XI	X gespiegelt	0	24,6717	36,6556	-
XII	homogenes Dichteprofil	0	0	48,9891	-

Im Folgenden soll die Auswirkung eines linearen Dichtegefälles auf das Flächengewicht über der Höhe im Material im Vergleich zu einem homogenen Dichteprofil mit der mittleren Setzungsdichte des Dichteprofils dargestellt werden. In Abbildung 5-48 sind die Dichteprofile, wie beschrieben, über der Materialtiefe aufgetragen.

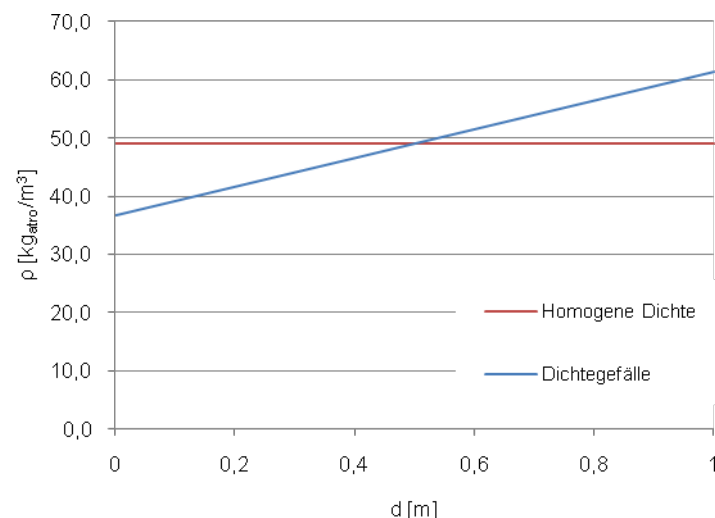
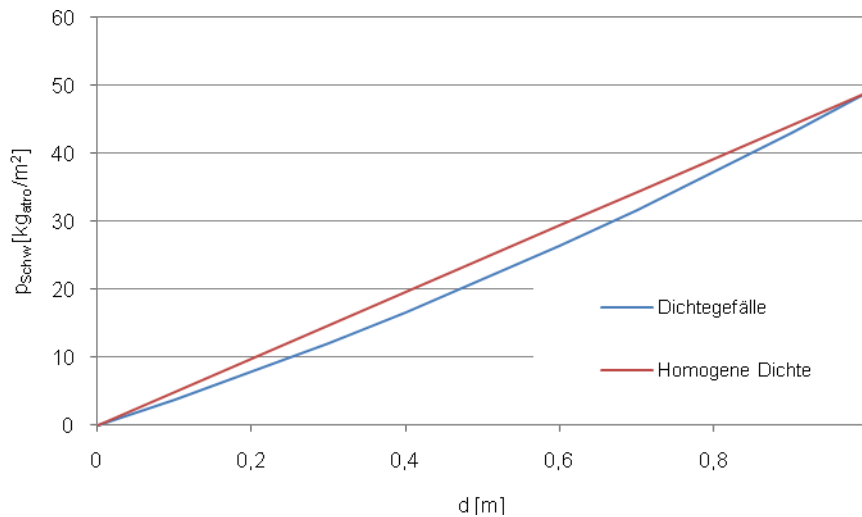


Abbildung 5-48 homogenes Dichteprofil (RGP Nr. XII) und Dichtegefälle (RGP Nr. XI) über der Materialtiefe

Durch Integration über der Materialtiefe  $d$  in  $W [0;1]$  ergibt sich der Verlauf des Flächengewichts  $\rho_{\text{Schw}}$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] des Materials (Abbildung 5-49) entsprechend den Funktionen in Tabelle 5-30.

Tabelle 5-30 Integrale der Funktionen aus Tabelle 5-29

Nr.	RGP	$p_{\text{Schw}}(d) = a_2 \cdot d^2 + a_1 \cdot d + a_0$			$R^2$
		$a_2$	$a_1$	$a_0$	
XIII	$\int (XI) dx$	12,3359	36,6556	0	-
XIV	$\int (XII) dx$	0	48,9891	0	-

Abbildung 5-49 Schweredruck der Materialsäule [kg/m<sup>2</sup>] aufgetragen über der Materialtiefe

Die Schnittpunkte in Abbildung 5-49 bei 0 m und 1 m Tiefe ergeben sich logisch. Der Schweredruck an der Oberfläche des Materials muss Null sein, der Schweredruck in der untersten Bauteilschicht (1 m Materialtiefe) entspricht dem der mittleren Dichte, ist also in beiden Fällen gleich. Die Differenz der beiden Kurven repräsentiert nun die Entlastung, die sich aus dem Dichteprofil in der jeweiligen Schichttiefe ergibt. Insgesamt ist die Verringerung des Flächengewichts verhältnismäßig gering. Der Maximalwert der Differenz ist bei gleichem  $\Delta\rho$ , das Dichteprofil wird also flacher, bzw. steiler, je nachdem ob die Höhe größer oder kleiner wird, abhängig von der Gesamttiefe der Materialsäule oder, anders ausgedrückt, der Füllhöhe im Bauteil.

Bezogen auf die Setzungshöhe des Materials nach Versuchsende (0,652 m) ergibt sich bei  $\Delta\rho$  ca.  $24,5 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  eine maximale Entlastung von ca.  $3,1 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^2$ . Bei einer Grundfläche des verwendeten Bauteils von  $0,1 \text{ m}^2$  lasten durch das Dichtegefälle in der Mitte des Bauteils also ca.  $0,310 \text{ kg}$  weniger Dämmung auf dem Material in dieser Schicht als bei einer homogenen Dichteverteilung. Dies ist eine Entlastung der mittleren Schicht von ca. 12,5 %. Die Auswirkung auf die mittlere Setzungsdichte nach Versuchsende kann als verhältnismäßig gering eingeschätzt werden.

Unter der Annahme, dass ein gezielt eingebrachtes Dichteprofil, wie es nach Ende der Setzungsmessungen aufgenommen wurde, unter entsprechenden Belastungen volumenstabil bleibt, lässt sich mit diesem Verfahren gegenüber einem homogenen Dichteprofil auch gezielt ein reduzierter Materialverbrauch und eine absolute Entlastung der unteren Materialsichten erzielen. Unter folgenden Annahmen soll nun die Auswirkung einer solchen Maßnahme auf die Entlastung der Materialsichten und auf die absolute Materialersparnis dargestellt werden.

Die auf dem Kleinprüfstand ermittelte volumenstabile Dichte wird bei den Mischungen mit Altpapierflocken, geprüft mit dem kleinen Gefach, nach der zweiten Versuchsreihe im unteren Drittel erreicht (Abbildung 5-50).

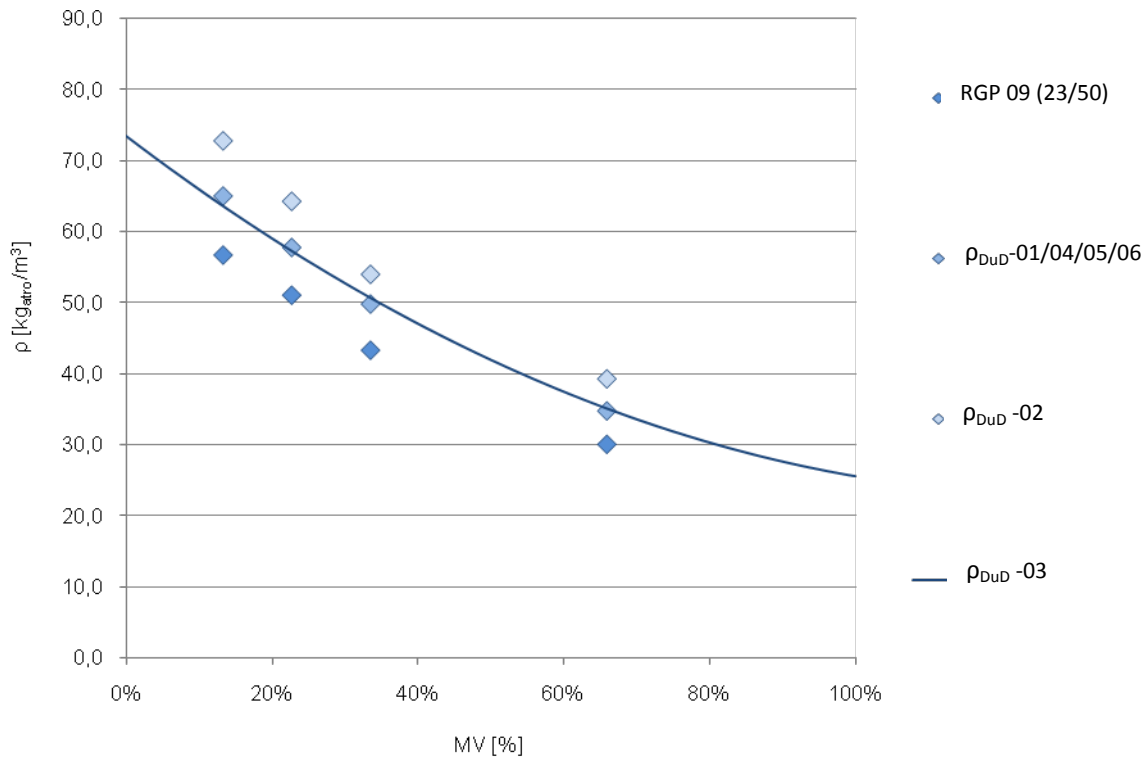


Abbildung 5-50 mittlere Dichte im unteren Drittel ( $\rho_{DuD}^{**}$ ) der geprüften Mischungen mit Altpapierflocken im Vergleich mit der volumenstabilen Dichte, ermittelt auf dem Kleinprüfstand

Unterwirft man nun das im zweiten Versuchsdurchgang der Mischungen mit Altpapierflocken A09-52-02(neu), C09-41-02 und D09-30-02 ermittelte Dichteprofil wie vorher einer Regressionsanalyse, so erhält man entsprechend der Skalierung aus Abbildung 5-47 wieder drei lineare Funktionen der Dichte über der auf 100 % skalierten Setzungshöhe. Das hieraus errechnete  $\Delta \rho_{max}$  wird auf eine realistische Gefachhöhe von 2,50 m übertragen und es lassen sich Funktionen, entsprechend Abbildung 5-48 aufstellen, welche das Dichteprofil über der Materialtiefe von oben nach unten betrachtet repräsentieren. Diese Dichtegefälle sollen im Folgenden mit einem homogenen Dichteprofil verglichen werden, das einer über der Gefachhöhe gleichmäßigen Einbringung der Dichte des unteren Drittels entspricht. Die linearen Dichteprofile und die jeweils homogenen Einbringdichten sind in Abbildung 5-51 dargestellt. Die zugehörigen Funktionen finden sich in Tabelle 5-31.

Tabelle 5-31 Funktionen und Integrale zu Dichteprofilen

Nr.	RGP	$a_2$	$a_1$	$a_0$	
		$\rho(d) = a_2 * d^2 + a_1 * d + a_0$			
XV	RGP A09-52-02(neu) lineares Dichteprofil	0	-20,3919	69,3747	0,94
XVI	RGP C09-41-02 lineares Dichteprofil	0	-13,1846	51,9264	1,00
XVII	RGP D09-30-02 lineares Dichteprofil	0	-5,8435	34,8433	0,60
XVIII	XV gespiegelt/gestreckt -> DG-A09	0	8,1567	48,9828	-
XIX	XVI gespiegelt/gestreckt -> DG-C09	0	5,2739	38,7418	-
XX	XVII gespiegelt/gestreckt -> DG-D09	0	2,3374	28,9998	-
		$\rho_{Schw}(d) = a_2 * d^2 + a_1 * d + a_0$			
XXI	$\int (XVIII) dx$	4,0784	48,9828	0	-
XXII	$\int (XIX) dx$	2,6370	38,7418	0	-
XXIII	$\int (XX) dx$	1,1687	28,9989	0	-
		$\rho(d) = a_2 * d^2 + a_1 * d + a_0$			
XXIV	homogen A09	0	0	65,0000	-
XXV	homogen C09	0	0	49,8000	-
XXVI	homogen D09	0	0	34,8000	-
		$\rho_{Schw}(d) = a_2 * d^2 + a_1 * d + a_0$			
XXVII	$\int (XXIV) dx$	0	65,0000	0,0000	-
XXVIII	$\int (XXV) dx$	0	49,8000	0,0000	-
XXIX	$\int (XXVI) dx$	0	34,8000	0,0000	-

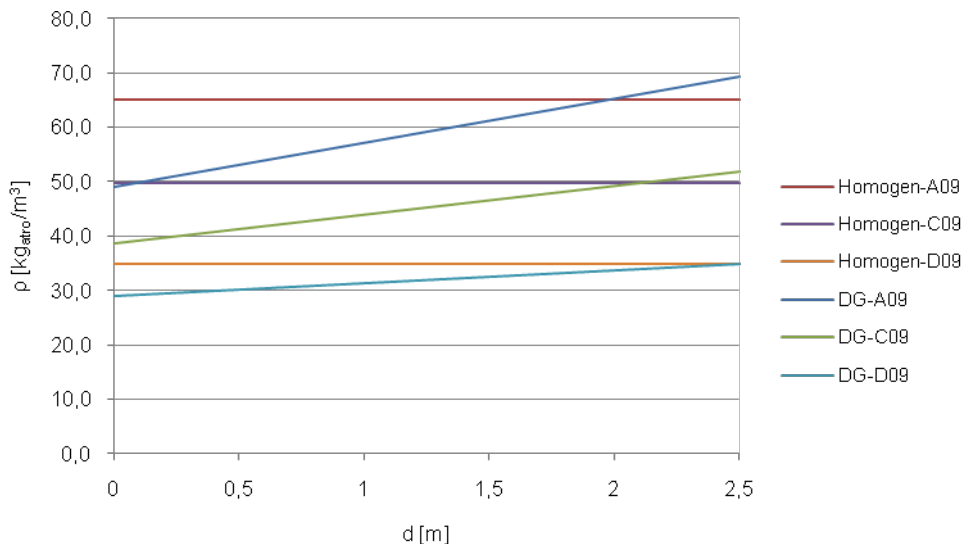


Abbildung 5-51 Dichteprofile entsprechend den Funktionen in Tabelle 5-31

Durch Integration erhält man wieder die Funktion des Flächengewichtes bei zunehmender Materialtiefe (Abbildung 5-52). Entsprechend der Steilheit des linearen Dichteprofiles sowie des Schnittpunktes mit der homogenen Dichte ergeben sich unterschiedlich stark ausgeprägte Differenzen zwischen den beiden Modellen (Abbildung 5-53). Der Schweredruck bei 2,5 m Gefachtiefe multipliziert mit dem Bauteilquerschnitt repräsentiert den Unterschied in der eingebrachten Masse. Mit steigendem Anteil an FES wird das gemessene Dichteprofil flacher, was zu einem geringeren  $\Delta \rho_{max}$  führt. Die prozentuale Materialersparnis sinkt demzufolge ausgehend von der Mischung A09 mit 14,7 %, über C09 mit 9,0 % auf 8,4 % bei der Mischung D09.



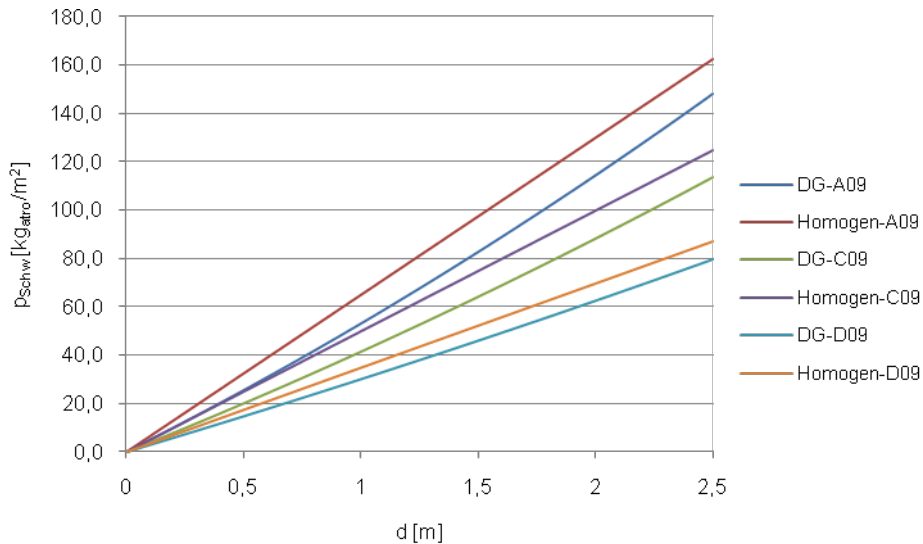


Abbildung 5-52 Flächengewicht, entsprechend den Funktionen in Tabelle 5-31

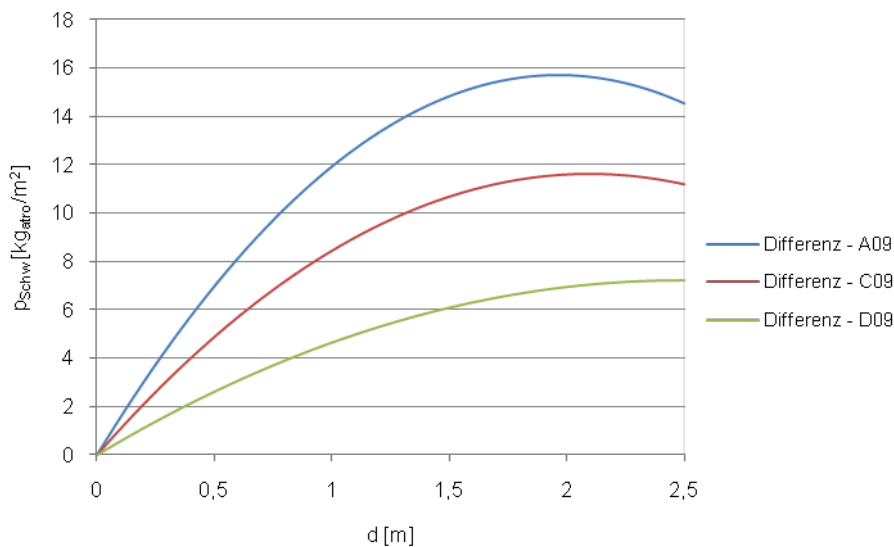


Abbildung 5-53 Differenz des Flächengewichts zwischen homogenem und linearem Dichteprofil, entsprechend Abbildung 5-51

#### 5.2.6.2.4 Zusammenhang zwischen Streudichte und Mischungsverhältnis sowie Setzungsdichte und Mischungsverhältnis, in Gegenüberstellung zu den auf dem Kleinprüfstand erzielten Werten

Im Folgenden sollen die in den Versuchen mit dem kleinen Gefach erzielten Setzungsdichten (SD) mit den Werten der Setzungsdichte aus dem Kleinversuch (5.2.6.1) verglichen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind für die geprüften Mischungen A08 – D08 und A09 – D09 die Startdichte sowie die bei den Einzelversuchen jeweils nach Versuchsende erreichte bzw. bei der ersten Verdichtungsstufe der Mischungsansätze A\*\*, C\*\* und D\*\* aus vier Versuchen gemittelte Setzungsdichte in einer einheitlichen Skalierung dem Regressionspolynom RGP \*\* (23/50) aus 5.2.6.1 gegenübergestellt (Abbildung 5-54 und Abbildung 5-55) .

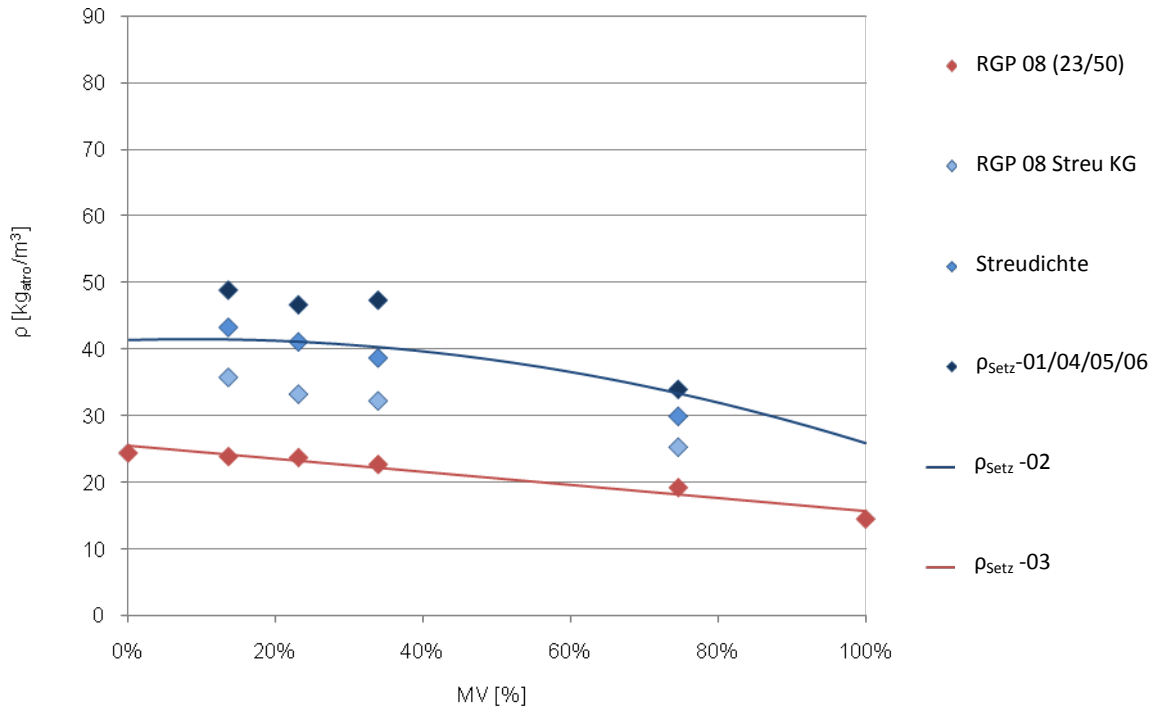


Abbildung 5-54 Setzungsdichte auf dem Kleinprüfstand (RGP 08) in Gegenüberstellung zu den Bauteilversuchen ( $\rho_{\text{Setz}}$ ); Streudichte im Bauteil; Mischungen mit Faserstoff H08 und FES H01

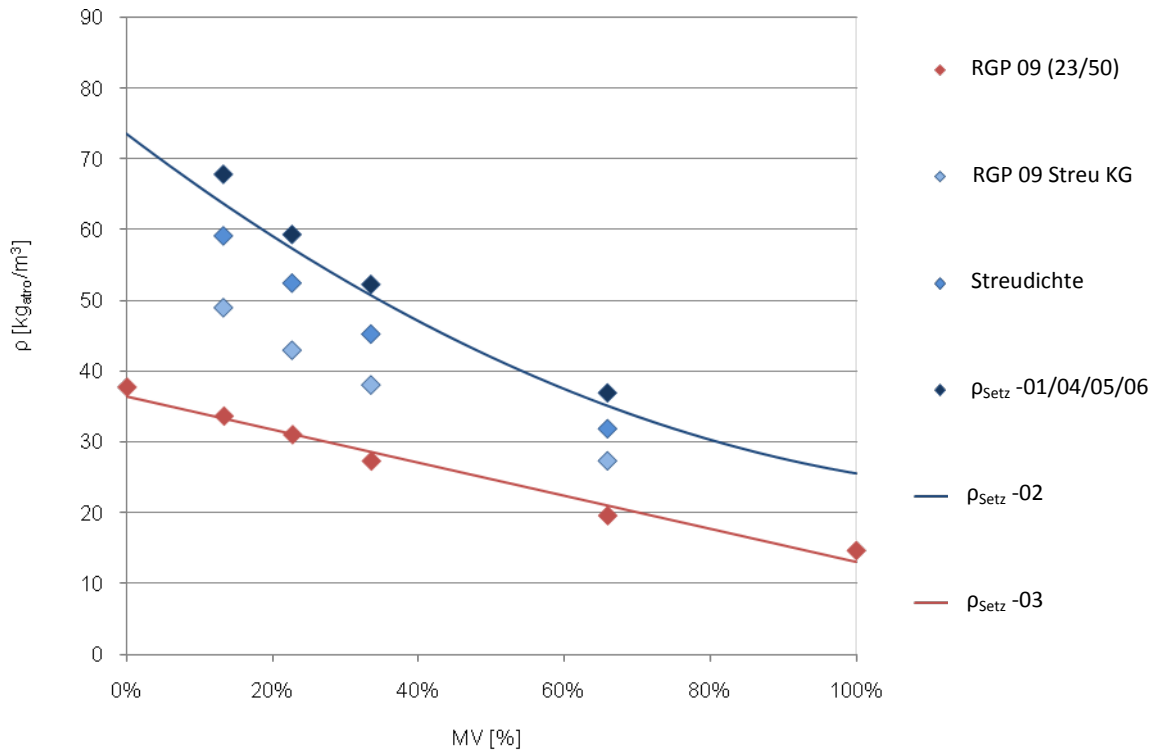


Abbildung 5-55 Setzungsdichte auf dem Kleinprüfstand (RGP 09) in Gegenüberstellung zu den Bauteilversuchen ( $\rho_{\text{Setz}}$ ); Streudichte im Bauteil; Mischungen mit Altpapierflocken H09 und FES H01

Die eingezeichneten Regressionspolynome RGP 08 Streu KG und RGP 09 Streu KG beziehen sich auf die tatsächlich erreichte Startdichte der Versuche mit der geringsten Startdichte und liegen deshalb leicht über den Werten der als Streudichte definierten Dichte, die im Zuge der Versuche mit dem Kleinprüfstand (5.2.6.1) durch Einstreuung von Hand in den Prüfzylinder (entspricht der Methode 152

in 4.1.1.3 unter Einstreuung von Hand) ermittelt wurde. Bei der Befüllung des Gefachs über der Einstreuhöhe von 0,16 m (entspricht der Gefachtiefe bei Einstreuung im liegenden Zustand) füllt die vorbereitete Materialmasse das Prüfvolumen von 0,1 m<sup>3</sup> anfänglich aus. Im Zuge des Aufrichtens des Bauteils ist jedoch eine erste Setzung des Materials, verursacht durch das Eigengewicht, zu beobachten.

Das Material unterliegt nach der Einstreuung in das liegende Gefach und dem anschließenden Aufrichten der Konstruktion also bereits einer geringen Verdichtung, die sich im Prinzip auch auf das Startdichteprofil über der Materialhöhe auswirkt, was jedoch vernachlässigbar bleibt. Die Datenpunkte bei 0 % und 100 % Anteil FES H01 entsprechen der in 4.1.2.2 dargestellten Streudichte der Einzelmaterialien. Entgegen den Zusammenhängen bei den Versuchen mit dem Plexiglaszylinder auf dem Kleinprüfstand (5.2.6.1) zeigt sich bei den Versuchen mit dem kleinen Gefach ein ausgeprägt linearer Zusammenhang zwischen der Startdichte der Messungen und der Setzungsdichte nach Versuchsende. Die im Kleinversuch eingestellten Startdichten fallen niedriger aus, da sich nebeneinander liegende Agglomerate aus FES und Faserstoffkomponenten in dem verhältnismäßig begrenzten Volumen des Prüfzylinders gegeneinander abstützen können. Es liegen also neben der Hohlraumstruktur des eigentlichen Materialgefüges der Mischung auch viele Hohlräume vor, die sich aus der Systematik der Einstreuung ergeben und die, bei den Setzungsversuchen mit dem Bauteil nach dem Aufrichten des Gefachs, auch in Abhängigkeit des Eigengewichts spezifisch verkleinert werden. Die als Startdichte gemessenen Werte sind daher stets nur unter den ausgeführten Versuchsbedingungen für die Mischungen repräsentativ.

Tabelle 5-32 Regressionspolynome für den Zusammenhang Startdichte ( $\rho_{\text{Start}}$ ) in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses (MV)

		$\rho_{\text{Start}}(\text{MV}) = a_1 \cdot \text{MV} + a_0$		
Nr.	RGP	$a_1$	$a_0$	$R^2$
VIII	RGP 08 Streu KG	-9,7402	25,4806	0,94
IX	RGP 09 Streu KG	-23,2757	36,4164	0,98

Bezüglich der Korrelation zwischen der auf dem Kleinprüfstand ermittelten Setzungsdichte im Vergleich mit den auf dem kleinen Gefach erzielten Werten lässt sich feststellen, dass bei den Mischungen mit Faserstoff innerhalb der im Bauteil geprüften Materialmischungen tendenziell eher lineare Zusammenhänge zwischen der Setzungsdichte und dem Mischungsverhältnis vorliegen. Im Vergleich mit dem in 5.2.6.1 entsprechend diskutierten Funktionsverlauf muss allerdings angemerkt werden, dass bei den Bauteilversuchen insgesamt eine schwächere Datenbasis vorliegt. Die Werte zu den Versuchen mit steigender Startdichte (\*02 und \*03) wurden jeweils nur mit einem Versuch ermittelt.

Die erzielte Setzungsdichte bei den Mischungen mit Altpapierflocken korreliert über den gesamten Bereich des Mischungsverhältnisses sehr gut mit den auf dem Kleinprüfstand ermittelten Werten.

Die bisher diskutierten Werte der Setzungsdichte repräsentieren die mittlere Dichte des Materials nach Ende des Versuchs. Wie beschrieben, liegt jedoch in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses und der relativen Verdichtung ein mehr oder minder stark ausgeprägtes Dichteprofil über der Höhe vor. Die Werte der lokalen Dichte im unteren Drittel verhalten sich im Rahmen der Genauigkeit der Methode entsprechend der mittleren Setzungsdichte, weshalb sich die gute Korrelation zu den Werten auf dem Kleinprüfstand auch hier bestätigt.

5.2.6.3 Versuche zum Kompressionsverhalten

Mit den in den Hauptversuchen verwendeten Materialien und Mischungen wurde das Kompressionsverhalten während einer kontrollierten Verdichtung, entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.2, mit fünf Einzelversuchen je Material geprüft.

Tabelle 5-33 Regressionspolynome für den Zusammenhang Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule (VF), sowie die mittlere Materialfeuchte nach Versuchsdurchführung

Mischung	$F(VF) = a_2 * VF^2 + a_1 * VF + a_0$			$R^2$	u [%]
	$a_2$	$a_1$	$a_0$		
H01	12,8549	14,4659	-33,8672	1,00	7,9
H02	346,1891	-811,2182	486,8356	1,00	10,0
H08	69,1883	-175,0154	115,7990	1,00	8,6
H09	72,2065	-220,3280	167,3855	0,99	6,0
A08	45,4486	-97,7919	55,8657	1,00	9,3
C08	33,7876	-57,3832	23,3725	1,00	8,4
D08	23,7078	-11,6868	-17,3674	1,00	7,8
E08	191,2522	-437,2234	261,2108	1,00	9,8
F08	120,5049	-305,2053	204,2854	1,00	9,7
A09	44,1768	-120,7666	84,6831	1,00	6,8
C09	30,3260	-65,6676	37,1818	1,00	7,6
D09	21,8208	-16,9028	-9,3200	1,00	8,3

In Tabelle 5-33 sind die Koeffizienten des Regressionspolynoms für den Zusammenhang Kraft F [N] in Abhängigkeit vom dimensionslosen Verdichtungsfaktor VF [-] dargestellt. Das angeführte Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zeigt mit Werten nahe 1,0 einen sehr straffen Zusammenhang zwischen den Messwerten und der Regression. Der Bezug auf die Verdichtung in Relation zur Streudichte ( $VF = 1,0$  = ‚Streudichte‘) ermöglicht den direkten Vergleich des Kompressionsverhaltens von Materialien unterschiedlicher Schüttgewichte. In Abbildung 5-56 und Abbildung 5-57 sind die Polynome nach Tabelle 5-33 für einen Verdichtungsfaktor zwischen 1 und 5 dargestellt.

Es zeigt sich, dass bei niedrigen Verdichtungsfaktoren ( $VF < 3,0 - 3,5$ ) eine klare Differenzierung zwischen den geprüften 2-komponentigen Mischungen schwierig ist. Bei höheren Verdichtungsfaktoren lässt sich erkennen, dass sich die Materialmischungen, entsprechend ihrem Mischungsverhältnis, zwischen dem Kompressionsverhalten der beteiligten Einzelmaterialien einordnen, wobei bei den Mischungen mit Altpapierflocken eine Unterscheidung zwischen den Mischungen C09 und D09 nicht möglich ist.

Die Beimengung des FES lässt das Material weicher werden; zum Verdichten wird weniger Kraft benötigt.

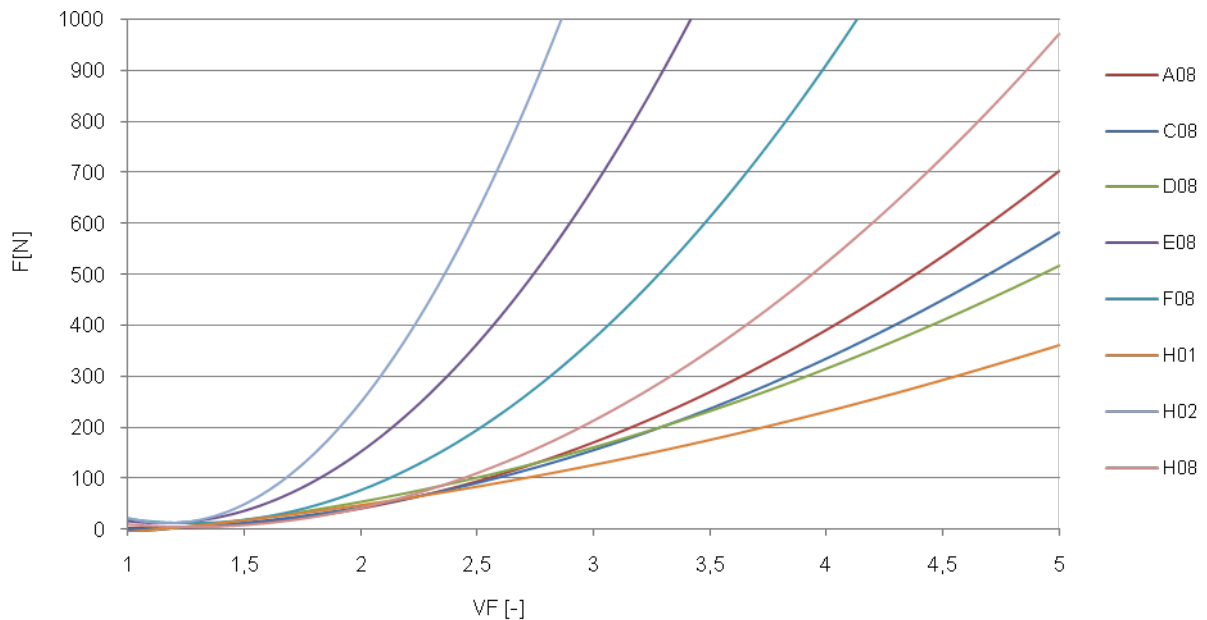


Abbildung 5-56 Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule [VF] für die Einzelmaterialien H01, H02, H08 sowie die Mischungen A08, C08, D08, E08 und F08

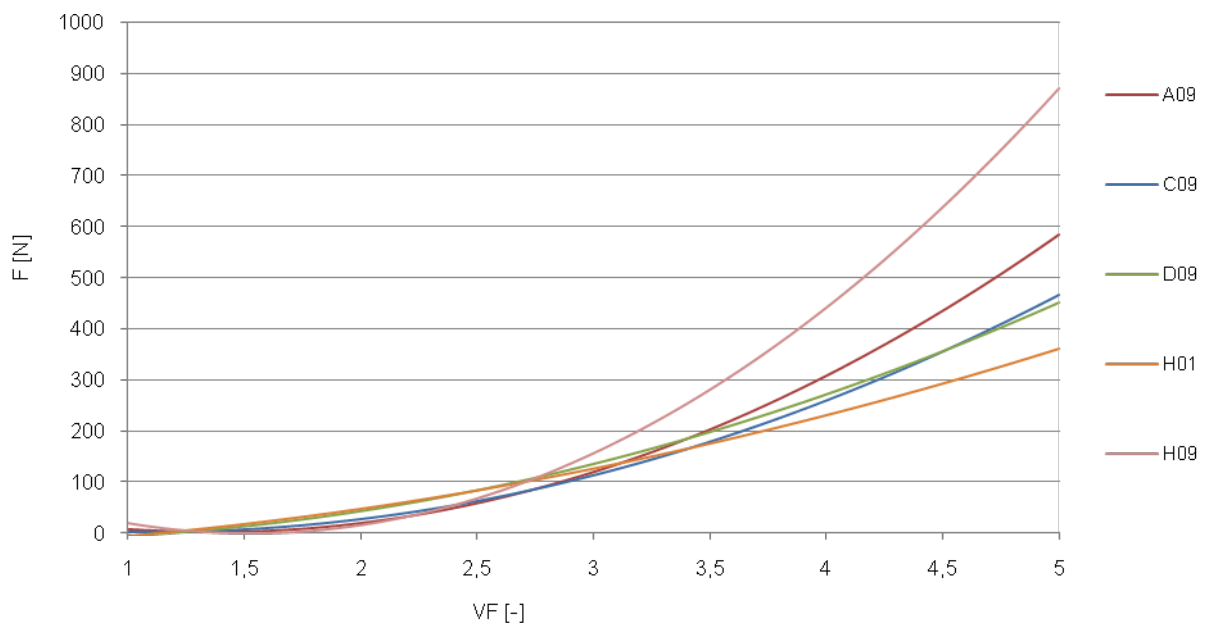


Abbildung 5-57 Kraft [N] über der Verdichtung der Materialsäule [VF] für die Einzelmaterialien H01 und H09 sowie die Mischungen A09, C09 und D09

#### 5.2.6.4 Untersuchungen zur Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen im Material

Entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.2.4 wurde für die in den Hauptversuchen verwendeten Materialien FES H01 und Altpapierflocken H09 sowie den daraus hergestellten Mischungen A09, C09 und D09 die Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen in die Materialstruktur untersucht. Neben einer Messung der Schwingungsübertragung bei sukzessive steigenden Einbringdichten soll auch der Einfluss der Materialfeuchte auf das Schwingungsverhalten der Materialschicht dargestellt werden.

#### 5.2.6.4.1 Orientierende Untersuchungen zur Messung der Schwingungsübertragung bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen

Zu Beginn wurden orientierende Untersuchungen durchgeführt. Die Versuche mit den Materialvarianten A09, C09 und D09 wurden im unregelmäßigen Raumklima durchgeführt. Materialspezifisch stellten sich Feuchten zwischen 8,3 % und 9,1 % ein. Erste Versuche wurden durchgeführt, um die Praktikabilität der Methode zu überprüfen sowie die in 4.2.2.4 beschriebenen Messparameter, wie Abtastrate und Anzahl der Messungen, festzulegen. In Abbildung 5-58 sind, getrennt nach den Materialvarianten, jeweils zwei Belastungsniveaus  $a_{\text{außen}}$  ca. 0,75 g und 3,75 g sowie die im Material gemessene Schwingungsantwort fouriertransformiert über der Frequenz aufgetragen. Die Messungen erfolgten mit einer Rohdichte, die der in den Versuchen zum Kompressionsverhalten (5.2.6.3) errechneten Streudichte, multipliziert mit dem Verdichtungsfaktor 1,25, entspricht. Alle Materialvarianten wurden also bei gleicher Kompression geprüft, womit sich unterschiedliche Rohdichten von  $A09 = 39 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ,  $C09 = 31 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  und  $D09 = 23 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  einstellen.

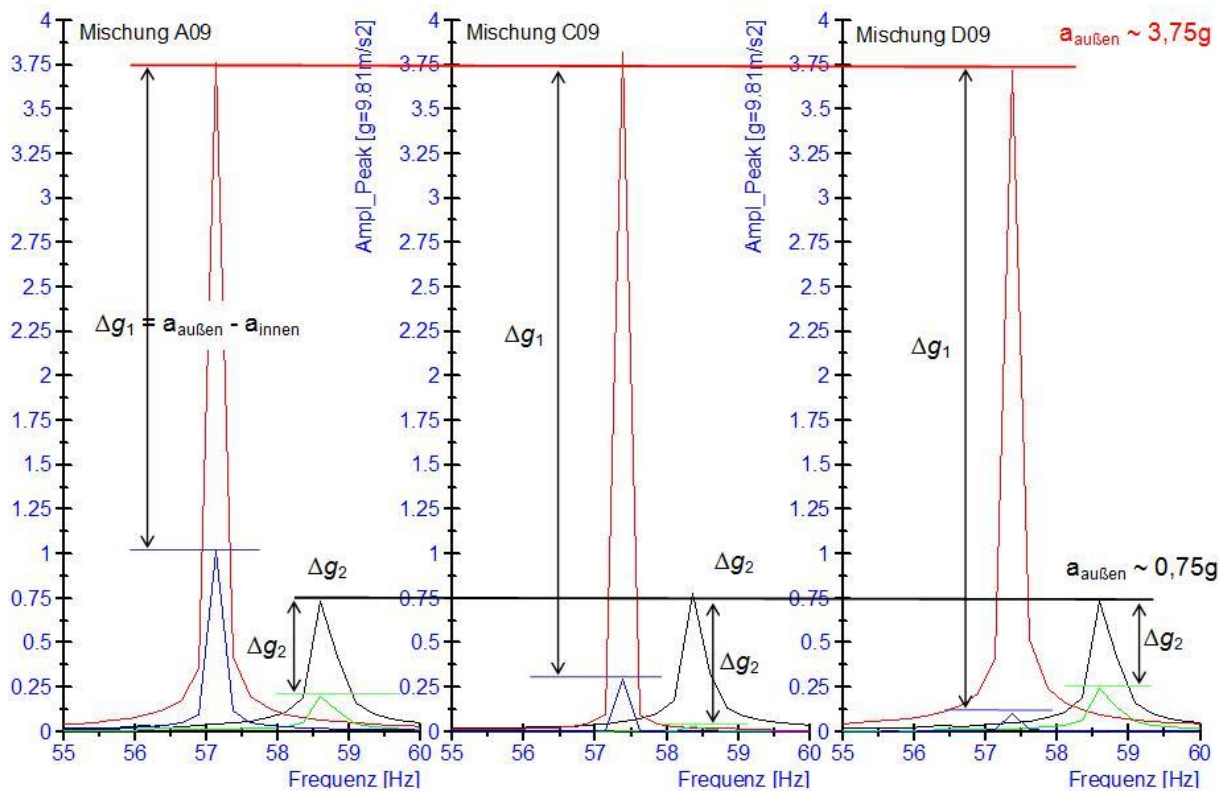


Abbildung 5-58 Fouriertransformiertes Beschleunigungssignal aufgetragen über der Frequenz für jeweils 2 unterschiedliche Schwingungbelastungen des Prüfzylinders und die im Material gemessene Schwingung; jeweils ermittelt bei einem VF = 1,25

Bei identischer Anregung des Prüfzylinders beeinflusst das Mischungsverhältnis offensichtlich die Übertragung von Schwingungen in das Material. Betrachtet man beispielsweise die Schwingungsantwort im Material bei der Anregung  $a_{\text{außen}}$  ca. 3,75 g, so ist deutlich zu sehen, dass mit zunehmendem Anteil an FES (A09 → D09) das zugehörige  $\Delta g_1$  größer wird. Offensichtlich nimmt bei dieser Anregung also mit steigendem Anteil an FES die Dämpfung zu. Das Material kann mehr Schwingungsenergie absorbieren.

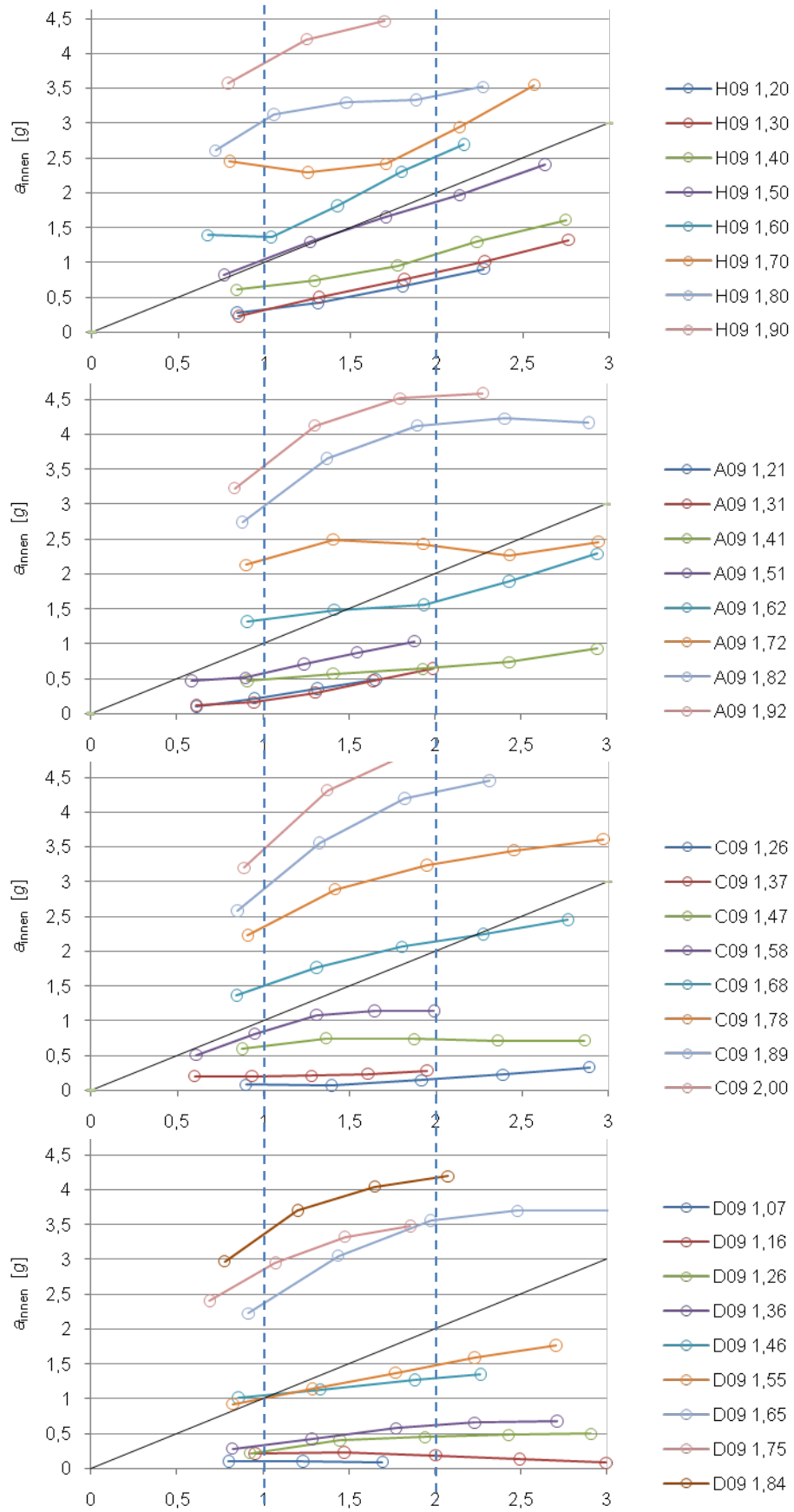
Bei einer Anregung des Prüfzylinders mit  $a_{\text{außen}}$  ca. 0,75 g verschieben sich die Verhältnisse. Das zugehörige  $\Delta g_2$  wird zunächst, den Verhältnissen bei  $\Delta g_1$  entsprechend, ausgehend von Mischung

A09 auf C09 größer. Bei der Mischung D09 wird die Übertragung allerdings wieder besser. Das hier gemessene  $a_{\text{innen}}$  übersteigt sogar etwas den bei Mischung A09 gemessenen Wert. Die bei allen Materialien zu beobachtende Frequenzverschiebung zwischen der Anregung bei ca. 0,75 g und ca. 3,75 g ist, genauso wie die zwischen den Mischungen leicht unterschiedlichen Frequenzen, auf das Regelungsprinzip der AS 200 control zurückzuführen. Das System schwingt in der Eigenfrequenz, die sich in Abhängigkeit von der dynamischen Masse einstellt.

#### 5.2.6.4.2 *Messung der Schwingungsübertragung bei sukzessiv steigender Einbringdichte*

Um die in den orientierenden Versuchen gewonnenen Beobachtungen systematischer abzubilden, wurden Messungen mit steigender Einbringdichte durchgeführt. Hierbei wurden je Beschleunigungs- und Dichtestufe fünf Beschleunigungsmessungen im Abstand von 10 s außen am Probenhalter und im Material aufgenommen. Das schwingungsgebende System, die AS 200 control, gibt dabei Sinusschwingungen mit einer geregelten Beschleunigung von Sollwerten zwischen 1 g– 4 g vor. Nach jeweils fünf Messungen wurde die Beschleunigung um 0,5 g erhöht. Hierbei entstehen vielschichtige Datensätze aus der Einbringdichte, der gemessenen Beschleunigung am Probenhalter und im Material.

Um das Verhalten der unterschiedlichen Materialien und ihrer Mischungen vergleichend darstellen zu können, wird die Einbringdichte auch hier auf die Streudichte der Materialvariante bezogen und der Wert dieses Quotienten als Verdichtungsfaktor (VF) bezeichnet. Ein  $\text{VF} = 1,0$  repräsentiert also die Streudichte des Materials. Die zu Grunde liegenden Streudichten entsprechen für die Einzelmaterialien H01 und H09 den in 4.1.2.2 dargestellten Werten. Für die Mischungen A09, C09 und D09 wurde wieder die in den Versuchen zum Kompressionsverhalten (5.2.6.3) errechnete Streudichte herangezogen. Die Materialien wurden vor der Versuchsdurchführung bis zur Massekonstanz bei 23/50 gelagert und die Versuche wurden in einem klimatisierten Labor bei 23/50 durchgeführt. Materialspezifisch stellten sich Feuchten zwischen 7 % (Altpapierflocken H09) und 8 % (FES H01) ein.





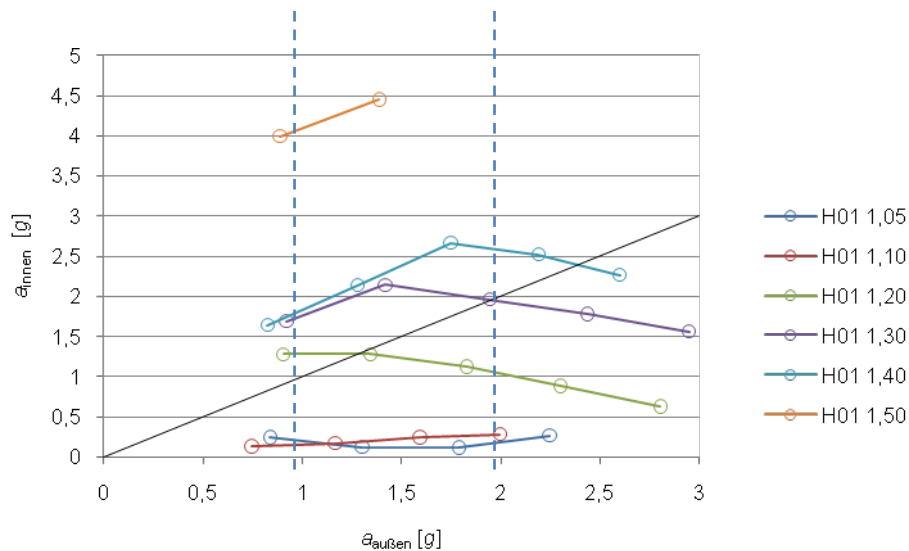


Abbildung 5-59 Übertragung von Schwingungsbeanspruchungen in die Materialschicht; die Bezeichnung der Datenreihe repräsentiert die Material / Mischungskennziffer und nachgestellt den Verdichtungs faktor der jeweiligen Messreihe; zusätzlich aufgetragen ist die Winkelhalbierende

Um einen Eindruck über die Schwingungsübertragung der Materialien bei steigendem VF (steigender Einbringdichte) zu erhalten, wurde in Abbildung 5-59 für alle durchgeführten Versuche (Materialien: H09, A09, C09, D09, H01) die gemessene Beschleunigung im Material ( $a_{\text{innen}}$ ) über der gemessenen Beschleunigung am Probenhalter ( $a_{\text{außen}}$ ) für unterschiedliche VF zwischen 1,0 und 2,0 graphisch aufgetragen. Jeder Datenpunkt repräsentiert den Mittelwert der, wie beschrieben, durchgeführten fünf Einzelmessungen. Die Einzelrealisierungen sind jeweils durch eine Linie verbunden, was der Verbesserung der Lesbarkeit dient. Eine Datenreihe bezieht sich jeweils auf einen VF.

Das erste Diagramm von oben enthält die Datenreihen für das Material Altpapierflocken H09, die weiteren Diagramme bilden die entsprechenden Zusammenhänge für die Mischungen A09, C09 und D09 bei steigendem Anteil des FES ab. Das letzte Diagramm repräsentiert die am FES H01 gewonnenen Daten. Der Anteil an FES der geprüften Materialien nimmt also von oben nach unten gesehen von 0 % (H09) bis 100 % (H01) zu. Es ist tendenziell zu beobachten, dass sich bei niedrigen Verdichtungs faktoren zunächst das Übertragungsverhältnis  $a_{\text{innen}} / a_{\text{außen}}$  (ÜV) beider Materialien und der Mischungen über die steigende Schwingungsanregung des Prüfzylinders ( $a_{\text{außen}}$ ) hinweg zumindest innerhalb des beobachteten Bereichs nahezu linear verhält. D. h., bei steigender Beschleunigung  $a_{\text{außen}}$  steigt die beobachtete Beschleunigung  $a_{\text{innen}}$  in einem relativ konstanten Verhältnis an. Mit steigendem VF wird zwar auch das ÜV größer, der Anstieg des ÜV bei steigendem  $a_{\text{außen}}$  bleibt jedoch zunächst annähernd gleich. Ab einem gewissen Verdichtungs faktor kippt dieser lineare Zusammenhang jedoch und die Beschleunigung  $a_{\text{innen}}$  scheint sich bei den Materialien H09, A09, C09 und D09 bei steigendem  $a_{\text{außen}}$  einem Grenzwert zu nähern, bzw. nimmt bei dem Material H01 sogar wieder niedrigere Werte an.

Es kann festgestellt werden, dass der beschriebene Zusammenhang des Abweichens des Übertragungsverhaltens von einem linearen Zusammenhang bei steigendem Anteil an FES (H09 → Mischungen → H01) schon bei immer niedrigeren Verdichtungs faktoren einsetzt. Eine augenscheinliche Abweichung der Datenreihe von einer Geraden bei dem Material Altpapierflocken H09 tritt ab einem VF = 1,80 – 1,90, bei den Mischungen A09 ab VF = 1,72 – 1,82, für C09 ab VF = 1,78, für D09 ab VF = 1,65 und für das Material FES H01 bereits ab einem VF = 1,20 – 1,30 auf. Die Beschleunigung  $a_{\text{innen}}$  wächst bei steigendem VF beim Material H01 (FES) deutlich schneller, d. h. bei umso kleinerem VF, überproportional (d. h.  $\text{ÜV} \geq 1$ ) an, als bei dem Einzelmaterial H09 und den

Mischungen. Über einer ansteigenden Beschleunigung  $a_{\text{au\ss en}}$  existieren offensichtlich materialspezifische und in Abhängigkeit vom VF unterschiedliche Zusammenhänge zwischen  $a_{\text{innen}}$  und  $a_{\text{au\ss en}}$ . Ein mathematisches Modell, welches auf Basis der vorliegenden Daten (Abbildung 5-59) sowohl für den gesamten Wertebereich von  $a_{\text{au\ss en}}$ , als auch für die unterschiedlichen VF Gültigkeit besitzt, führt zu einer 3D-Flächenapproximation, die den Zusammenhang  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF}; a_{\text{au\ss en}})$  abbildet.

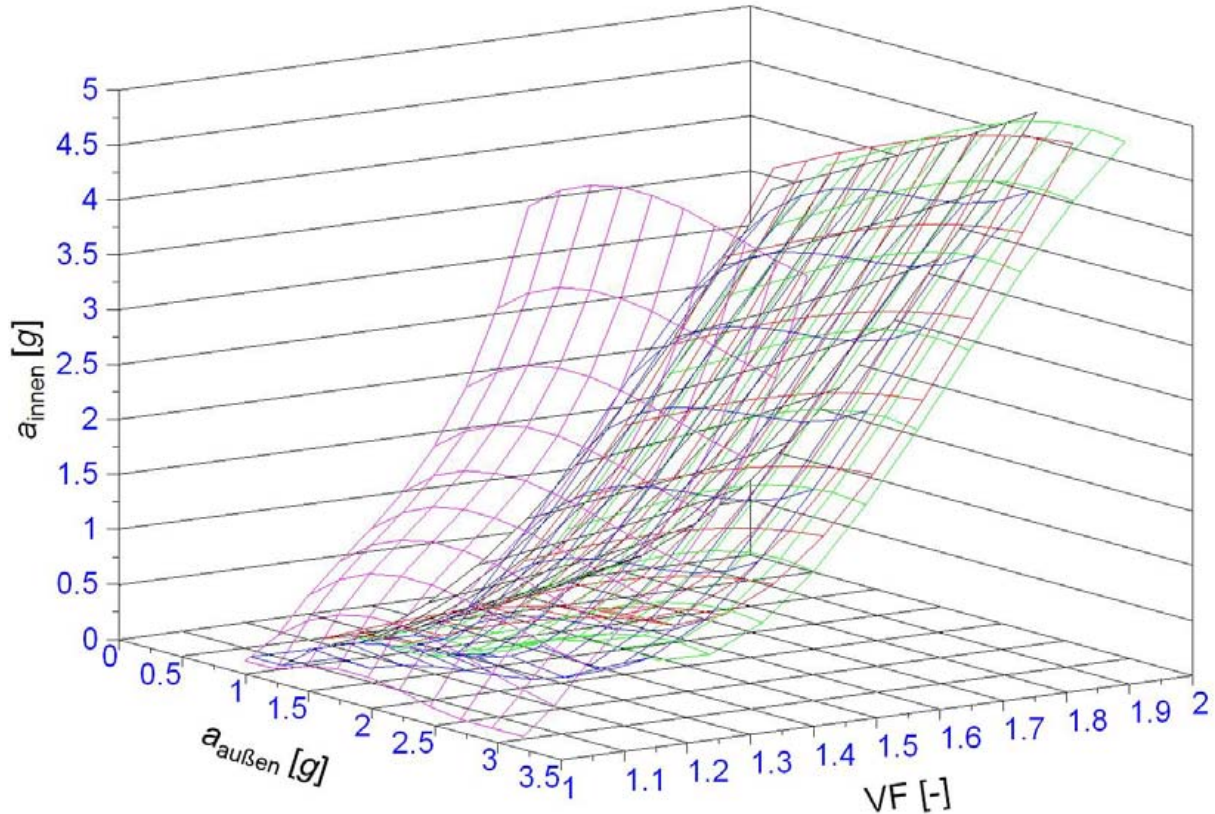


Abbildung 5-60 3D Flächenapproximationen für den Zusammenhang  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF}; a_{\text{au\ss en}})$

Der Ansatz zu den in Abbildung 5-60 dargestellten Flächenapproximationen entspricht der folgenden Gleichung 6 mit  $x = \text{VF}$ ,  $y = a_{\text{au\ss en}}$  und  $z = a_{\text{innen}}$ .

$$z = f(x,y) = a_1 + a_2 * x + a_3 * x^2 + a_4 * x^3 + a_5 * y + a_6 * y^2 + a_7 * y^3 \quad [6]$$

Die Koeffizienten  $a_1 - a_7$  für die untersuchten Varianten H09, A09, C09, D09 und H01 sind in Tabelle 5-34 dargestellt.

Tabelle 5-34 Koeffizienten der in Abbildung 5-60 dargestellten 3D-Flächenapproximationen gemäß Gleichung 6

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
H09	14,314	0,707	-0,069	0,018	-29,128	16,975	-2,491
A09	47,484	0,571	0,036	-0,027	-88,588	51,442	-8,986
C09	63,190	0,428	0,224	-0,075	-122,930	75,632	-14,556
D09	50,697	3,492	-1,644	0,266	-111,313	74,626	-15,578
H01	-117,364	2,681	-1,256	0,173	278,701	-225,510	61,965

Aus der Approximation zum Ansatz  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF}; a_{\text{au\ss en}})$  lässt sich durch die Berechnung von Flächenkurven relativ einfach auch der nicht explizit untersuchte Zusammenhang  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF})$  für die unterschiedlichen Materialvarianten abbilden. Die entsprechenden Flächenkurven lassen sich im

vorliegenden Fall durch die Berechnung der partiellen Funktion  $a_{\text{innen}} = f(VF; a_{\text{au\ss en}} = \text{konst.}) = f(VF)$  gewinnen. Die in Abbildung 5-61 geplotteten Funktionen gelten für  $a_{\text{au\ss en}} = \text{konst.} = 1,5 \text{ g}$ . Der absolute Verlauf verschiebt sich über den gemessenen Wertebereich von  $a_{\text{au\ss en}}$  zwar minimal, die Verhältnisse der einzelnen Mischungen zueinander bleiben jedoch qualitativ weitgehend identisch.

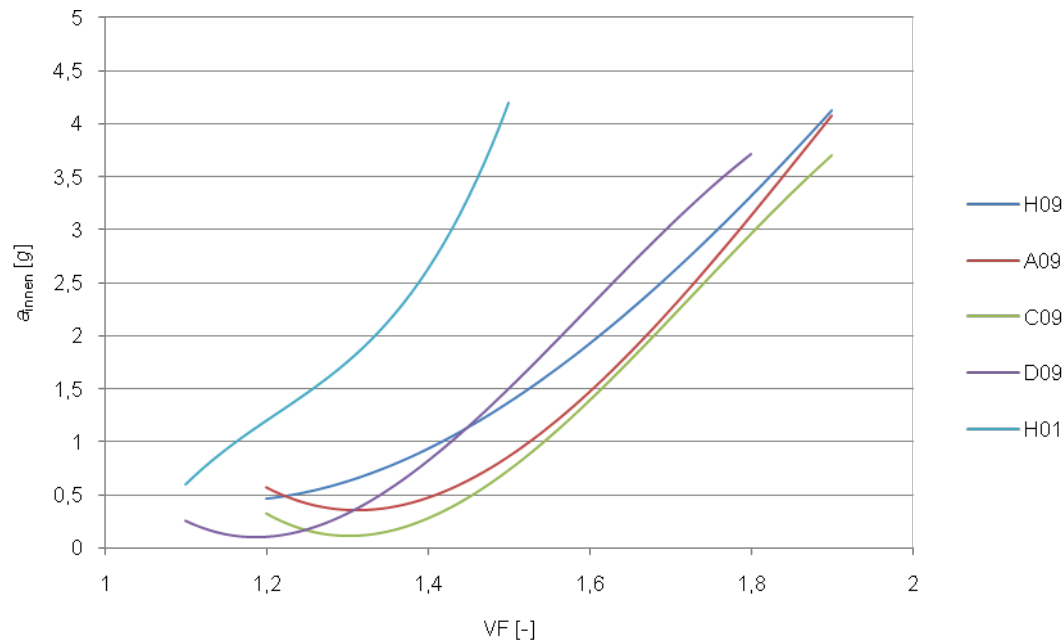


Abbildung 5-61 partielle Funktion  $a_{\text{innen}} = f(VF; a_{\text{au\ss en}} = 1,5)$  für die Materialvarianten H09, A09, C09, D09 und H01 entsprechend dem Ansatz nach Gleichung 6 mit den Koeffizienten nach Tabelle 5-34

Unter dem Optimierungsgedanken einer möglichst geringen Schwingungsübertragung, was einer möglichst großen Dämpfung entspricht, betrachtet, entwickeln die geprüften Materialvarianten offensichtlich im Bereich der Materialmischung C09 über die unterschiedlichen Verdichtungsfaktoren hinweg in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses einen Idealbereich, der sich durch die geringste Übertragung der am Prüfzylinder wirksamen Schwingung in das Material hinein auszeichnet. Durch eine erneute Approximation der entsprechend Abbildung 5-61 gewonnenen Wertetripel  $x = VF [-]$ ,  $y = MV [\%]$ ,  $z = a_{\text{innen}} [g]$  unter dem Ansatz nach Gleichung 6 erhält man die Koeffizienten nach Tabelle 5-35 und eine graphische Darstellung entsprechend Abbildung 5-62.

Tabelle 5-35 Koeffizienten der in Abbildung 5-62 dargestellten 3D-Flächenapproximation zum Ansatz nach Gleichung 6

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
Alle	21,253	-42,054	26,182	-4,568	-0,035	0,001	-1,016E-06

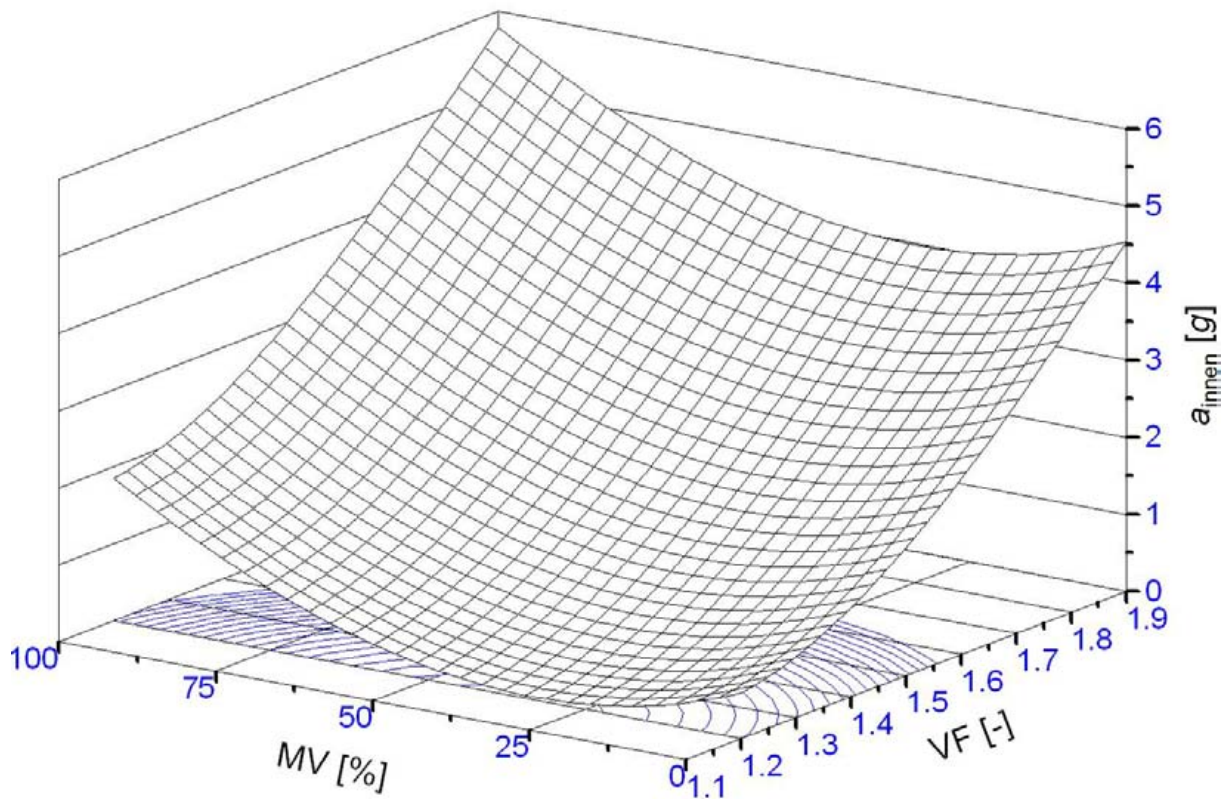


Abbildung 5-62 3D Flächenapproximationen für den Zusammenhang  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF}; \text{MV})$  mit Projektion der Isolinien

Eine Betrachtung der Fläche von der Seite MV [%],  $a_{\text{innen}} [g = 9,81 \text{ m/s}^2]$  aus zeigt im Bereich eines MV von ca. 20 % - 45 % einen Optimalbereich bezüglich des Verhältnisses von  $a_{\text{außen}} = 1,5 \text{ g}$  zu  $a_{\text{innen}}$ . Die Projektion von Isolinien für die Bedingung  $a_{\text{innen}} = \text{konst.}$ , dargestellt als Funktion  $\text{VF} = f(\text{MV}, a_{\text{innen}} = \text{konst.})$  aufgetragen auf der Ebene MV [%] = x, VF [-] = y führt zu einer Darstellung entsprechend Abbildung 5-63.

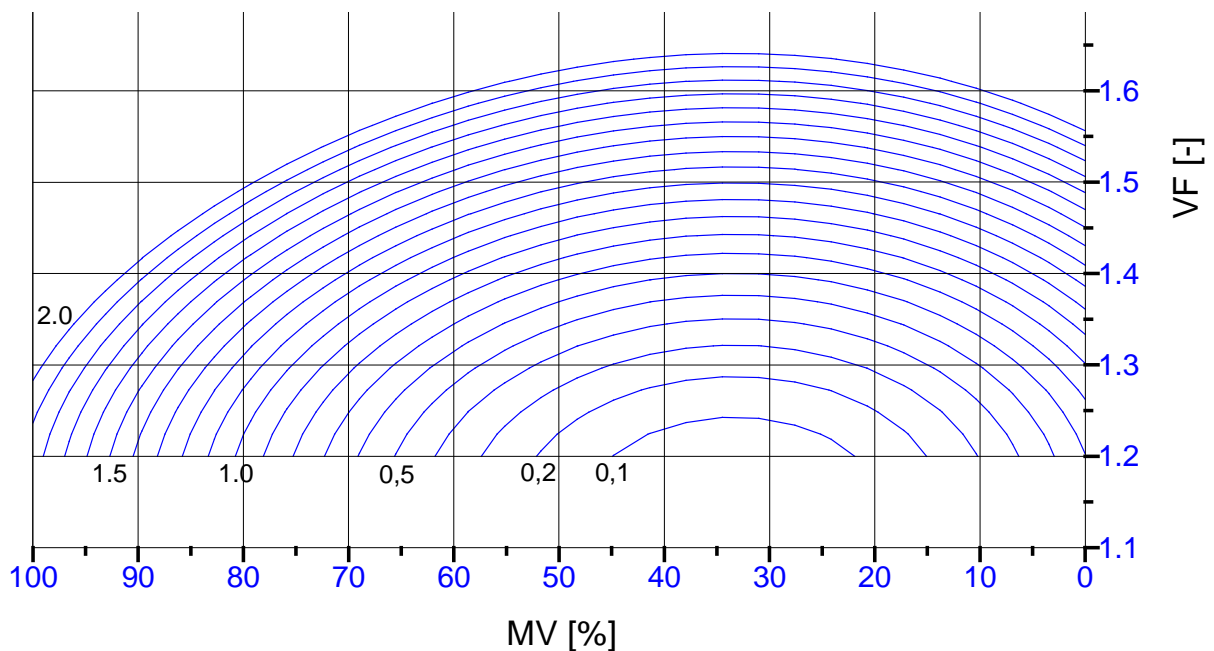


Abbildung 5-63: Isolinien  $a_{\text{innen}} = \text{konst.}$  für  $a_{\text{innen}} = 0,1 - 2,0 \text{ g}$  aus dem Zusammenhang  $a_{\text{innen}} = f(\text{VF}; \text{MV})$  für eine Anregung des Prüfzylinders mit  $a_{\text{außen}} = 1,5 \text{ g}$  projiziert auf die Ebene MV [%], VF [-]

Unter den gewählten Randbedingungen lässt sich aus Abbildung 5-63 nun für ein beliebiges Mischungsverhältnis und den vorliegenden VF als Vielfaches der Streudichte das zugehörige  $a_{\text{innen}}$  und unter der Berücksichtigung der dem Diagramm zu Grunde liegenden Beschleunigung  $a_{\text{außen}}$  auch das  $\ddot{U}V$  ablesen. Niedrige  $\ddot{U}V$  (in Abhängigkeit vom VF) lassen sich demnach in einem Bereich des MV ca. 15 % - 50 % FES erzielen.

#### 5.2.6.4.3 Messung der Schwingungsübertragung bei unterschiedlicher Materialfeuchte

Im Folgenden soll dargestellt werden, inwieweit sich innerhalb einer Mischungsvariante unterschiedliche Materialfeuchten auf die Übertragung von Schwingungen in die Materialschicht hinein auswirken. Hierzu wurden für die Mischungen A09 und D09 jeweils zwei Probenchargen für einen einheitlichen VF von 1,25 auf der Basis der Streudichte aus den Versuchen zum Kompressionsverhalten (5.2.6.3) vorbereitet. Eine Charge wurde jeweils bei 103°C eine Stunde getrocknet und bis zur eigentlichen Prüfung in einem Kunststoffbeutel diffusionsdicht eingeschlossen. Die zweite Charge wurde bei 20/95 klimatisiert und nach einer bestimmten Zeit ebenfalls in einem Kunststoffbeutel aufbewahrt, bis die Prüfung durchgeführt wurde. Die gemessenen Beschleunigungen  $a_{\text{außen}}$  und  $a_{\text{innen}}$  sind in Abbildung 5-64 graphisch aufgetragen. Aus der Datenreihenbeschriftung ist die nach Versuchsende gemessene Materialfeuchte ersichtlich.

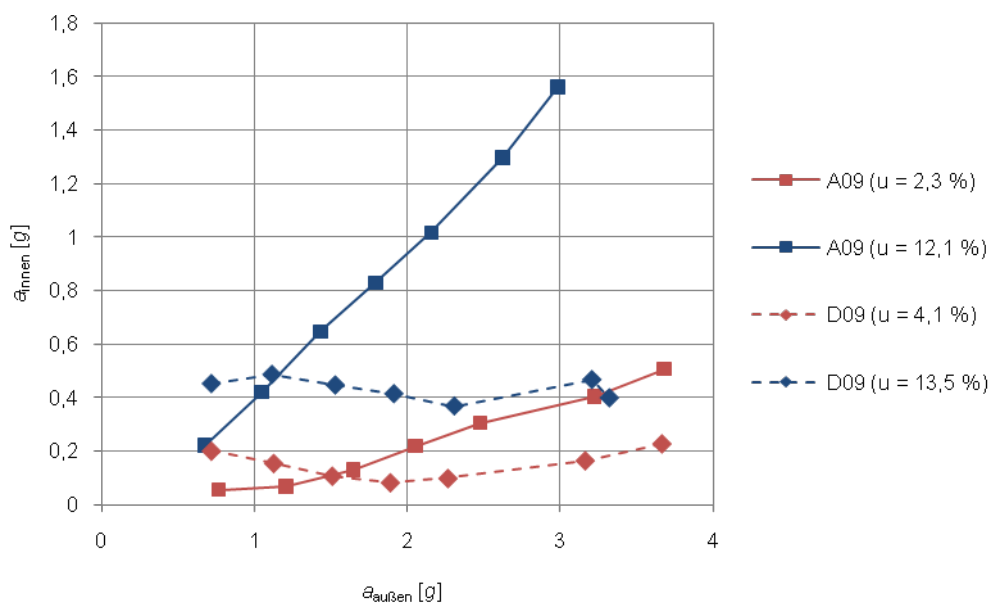


Abbildung 5-64 Beschleunigung  $a_{\text{außen}}$  und  $a_{\text{innen}}$  für die Varianten A09 und D09 bei unterschiedlichen Materialfeuchten

Es lässt sich erkennen, dass eine niedrige Materialfeuchte das  $\ddot{U}V$  geringer ausfallen lässt. Das trockenere Material kann offensichtlich mehr Schwingungsenergie absorbieren.

### 5.2.7 Hygroskopisches Verhalten

Um das hygroskopische Verhalten zu untersuchen, wurden die Sorptionsisothermen der Einzelmaterialien ermittelt sowie die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ausgewählter Mischungen bestimmt.

#### 5.2.7.1 Sorptionsisothermen

Die Sorptionsmessungen wurden entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.7 aufgenommen. In Abhängigkeit der eingestellten Luftfeuchtigkeit ergeben sich materialspezifisch unterschiedliche Materialfeuchten (Tabelle 5-36). Die sehr hohen Werte bei dem Material Faserstoff H08 / H08i für

98 % r. F. lassen sich wahrscheinlich auf freies Wasser in der Probe zurückführen und sind deshalb nicht repräsentativ. Der gleiche Effekt wurde für Faserstoff auch bei SCHOLZ 2000 beobachtet und ist dort beschrieben.

Tabelle 5-36 Materialfeuchten der durchgeführten Sorptionsmessungen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten und 20°C

	<b>FES H01</b>		<b>Hobelspan H02</b>		<b>Faserstoff H08</b>	
Luftfeuchte	Materialfeuchte [%]		Materialfeuchte [%]		Materialfeuchte [%]	
[%]	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	5,9	7,2	3,6	4,5	6,1	7,1
33	7,5	9,8	8,0	9,7	9,2	10,3
44	8,7	10,2	9,6	11,9	9,8	11,2
58	10,9	12,9	11,4	13,6	11,7	13,6
75	13,8	15,6	15,4	17,7	16,8	19,0
81	16,1	18,1	17,5	19,7	19,1	21,7
86	17,9	20,3	18,3	21,5	22,3	24,4
90	19,7	21,8	20,1	23,6	27,8	29,7
93	23,3	25,4	24,4	27,6	41,2	42,2
98	28,0	28,7	30,1	32,7	(94,1)	(128,9)
	<b>Faserstoff H08i</b>		<b>Altpapierflocken H09</b>		<b>Altpapierflocken H09i</b>	
Luftfeuchte	Materialfeuchte [%]		Materialfeuchte [%]		Materialfeuchte [%]	
[%]	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	4,2	6,7	3,1	3,9	2,7	5,3
33	7,3	10,5	6,3	7,6	6,1	9,9
44	8,9	12,5	7,0	8,5	7,7	11,4
58	11,2	14,5	8,4	10,1	10,2	12,8
75	16,1	20,1	10,9	13,2	13,0	16,5
81	18,3	22,5	11,8	14,4	13,8	18,1
86	21,4	25,9	12,9	15,8	15,9	20,6
90	24,9	30,1	14,5	18,1	17,6	24,9
93	35,7	39,9	17,9	22,4	22,4	32,3
98	(68,5)	(118,5)	25,8	32,2	40,9	80,6

Aus den Datensätzen wurden Sorptionsisothermen modelliert. Das verwendete mathematische Modell entspricht dem in NELSON 1983 beschriebenen Verfahren und basiert auf einem exponentiellen Zusammenhang zwischen der Änderung der Gibbs'schen freien Energie und der Ausgleichsfeuchte des Materials bei unterschiedlichen gemessenen Feuchten auf der Basis zweier bei SIMPSON 1973 beschriebenen Sorptionsmodelle. Die so ermittelten Isothermen entsprechen den zu Grunde liegenden Datenpunkten bei den Materialien H01 und H02 gut (Abbildung 5-65). Das Modell liefert jedoch, wie viele andere Sorptionsmodelle auch, beim Auftreten von Kapillarkondensation und freiem Wasser im Bereich hoher r. F. keine sinnvollen Ergebnisse mehr. In der Abbildung 5-66 sind deshalb für die Materialien H08 und H08i nur die Datenpunkte der Messung aus Tabelle 5-36 vergleichend abgebildet. Das Material Altpapierflocken H09i ist in Abbildung 5-67 nur im Bereich zwischen 10 % - 90 % r. F. durch das Sorptionsmodell beschrieben. Die Anpassung an die ermittelten Datenpunkte ist hier auch schlechter als bei den Spanmaterialien H01 und H02.

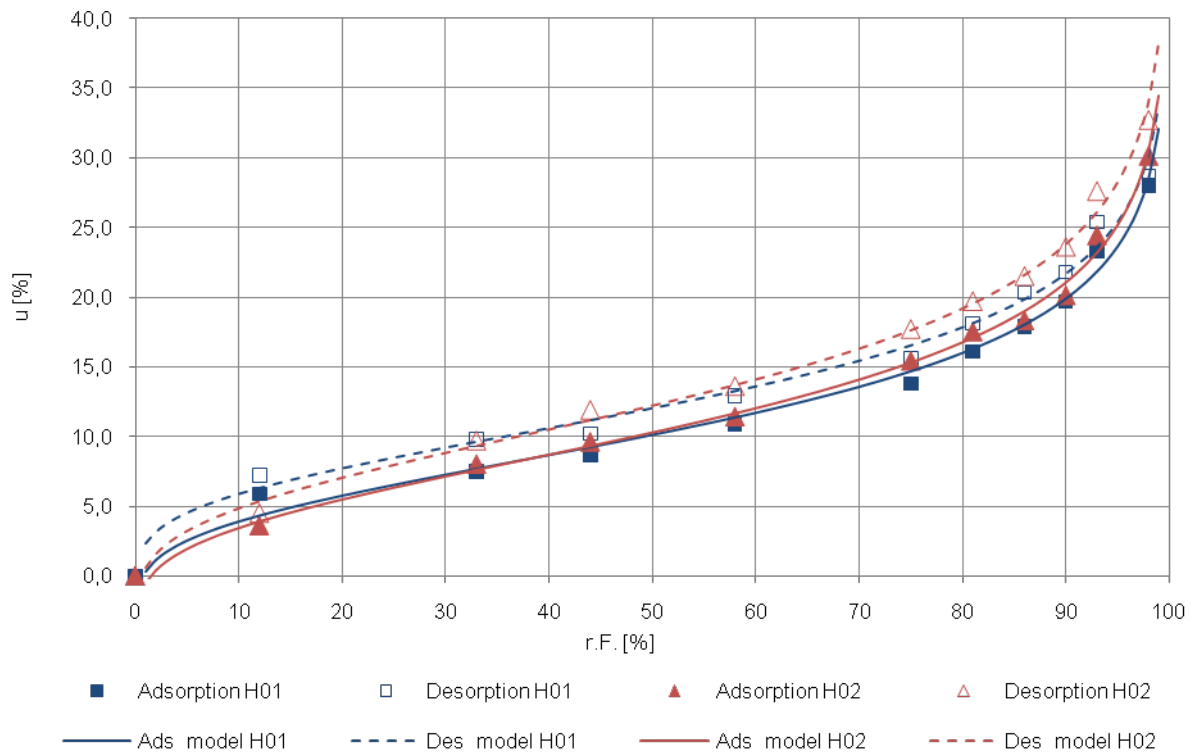


Abbildung 5-65 Sorptionsisothermen (Modellierung nach NELSON 1983) und Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H01 und H02

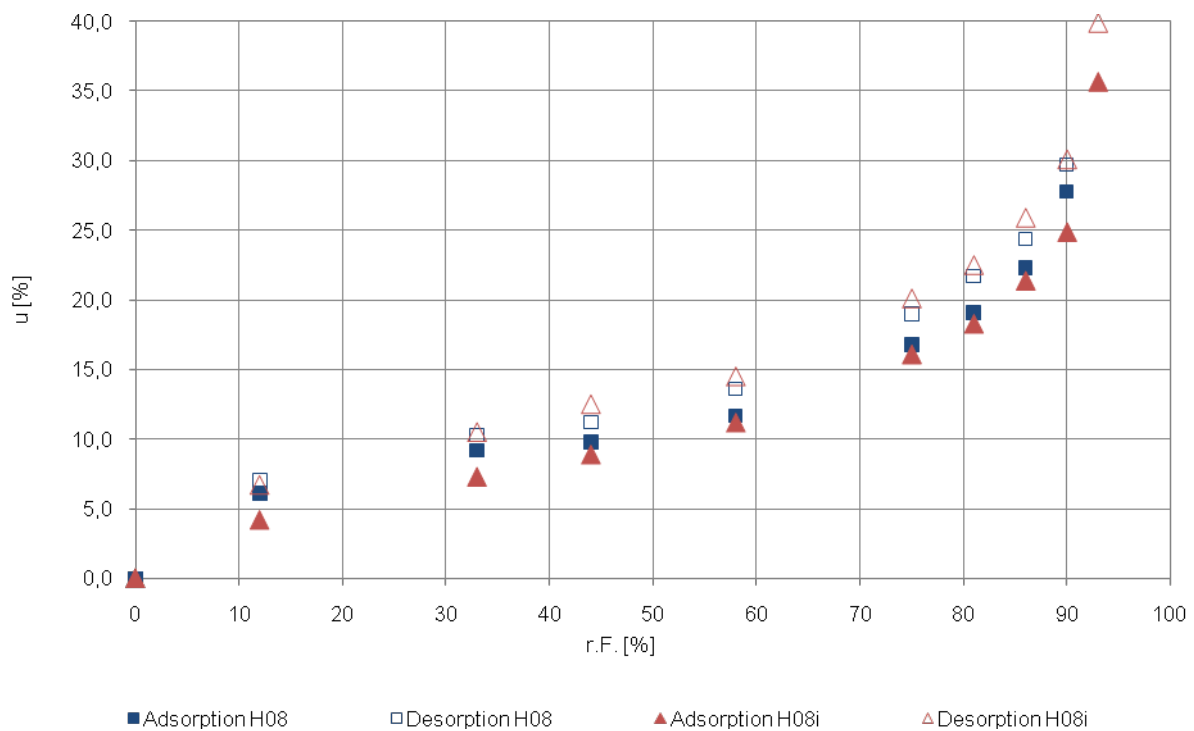


Abbildung 5-66 Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H08 und H08i

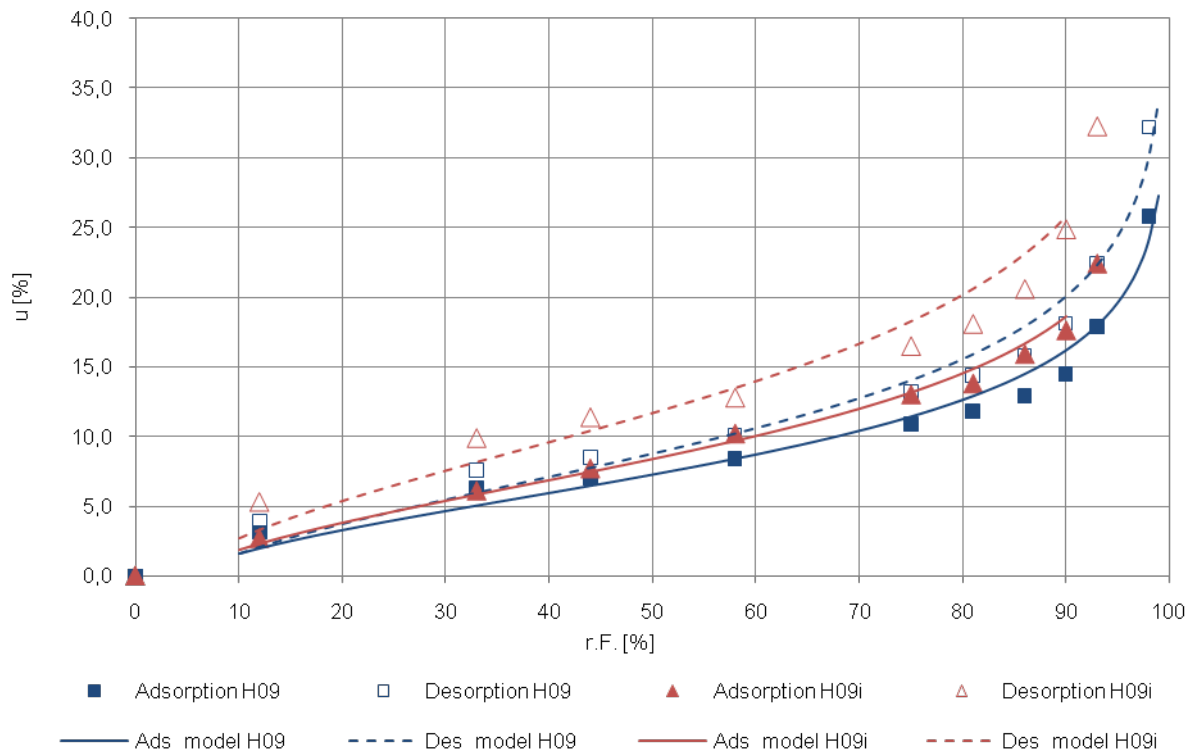


Abbildung 5-67 Sorptionsisothermen (Modellierung nach NELSON 1983) und Datenpunkte der Sorptionsmessung für die Materialien H09 und H09i

Im Prinzip zeigen alle Materialien eine typische s-förmige Typ-II-Isotherme. Der leicht unterschiedliche Verlauf der Isothermen der Materialien H01 und H02 verwundert, da beide Spanformen im Prinzip unter ähnlichen Zerspanungsbedingungen entstanden sind, wobei hier auch die Messungengenauigkeit des Verfahrens zu berücksichtigen ist. Die Standardabweichung der Feuchtebestimmung einer Stufe r. F. beträgt im Mittel ca. 1,0 %.

Die mittlere Sorptionsisotherme als Mittelwert aus Adsorption und Desorption verläuft bei den Materialien Faserstoff H08 und Faserstoff H08i im Bereich der r. F. < 90 % nahezu deckungsgleich. Bei der imprägnierten Variante H08i ist aber eine deutlich ausgeprägtere Hysterese zu beobachten. Die maximal gemessene Materialfeuchte bei r. F. > 90 % ist in beiden Fällen durch freies Wasser in der Probe bestimmt und deshalb nicht aussagekräftig.

Bei den Materialvarianten H09 und H09i zeigt sich, dass die Materialfeuchte der imprägnierten Variante durchgängig höher ausfällt und, wie bei den Faserstoffen auch, eine ausgeprägtere Hysterese zu beobachten ist.

#### 5.2.7.2 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wurde entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.8 durchgeführt. In Tabelle 5-37 und Tabelle 5-39 sind die Ergebnisse aller durchgeführten Einzelversuche mit trockenem und nassem Prüfgefäß dargestellt. Die Variationskoeffizienten schwanken bei Prüfung mit trockenem wie auch bei nassem Prüfgefäß in etwa gleich stark zwischen ca. 1,5 % - 18 % und liegen im Mittel bei ca. 6 %. Eine eindeutige Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis oder der Einbringdichte lässt sich nicht erkennen. Die ermittelte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl liegt bei allen Mischungen in einem Bereich zwischen ca. 1,1 - 2,7. Bei den 2-komponentigen Mischungen wird mit steigender Einbringdichte und steigendem Anteil an FES in jedem Fall auch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl größer.



Tabelle 5-37 Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl; Prüfgefäß trocken

Mischung	V1		V2		V3		V4		V5		$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$		
	$\mu$ [-]	$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	$\rho$ [kg <sub>Gastro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$\bar{x}$ [-]	s [-]	V [%]
A09	1,14	35,4	1,07	34,8	1,09	35,2	1,13	35,0	1,21	35,4	35,2	1,13	0,06	4,9
A09	1,26	50,4	1,23	50,1	1,27	50,4	1,25	50,3	1,27	50,9	50,4	1,26	0,02	1,3
A09	1,51	65,8	1,69	65,7	1,66	65,8	1,63	65,7	1,68	65,7	65,8	1,63	0,07	4,4
C09	1,32	35,7	1,37	35,9	1,31	35,7	1,36	35,8	1,40	35,7	35,8	1,35	0,04	2,7
C09	1,91	51,0	1,72	51,0	1,70	51,1	1,56	51,2	1,73	51,1	51,1	1,72	0,13	7,4
C09	1,93	66,3	2,69	66,0	1,95	66,2	2,27	66,0	1,94	66,4	66,2	2,15	0,33	15,5
D09	1,71	35,8	1,59	35,3	1,73	35,3	1,70	35,3	1,75	35,4	35,4	1,70	0,06	3,6
D09	1,95	50,4	1,85	50,5	1,95	50,3	1,98	50,6	1,94	50,4	50,4	1,93	0,05	2,5
D09	2,27	64,4	2,32	64,7	2,29	64,8	2,09	65,0	2,31	64,9	64,8	2,26	0,10	4,2
A08	1,23	35,1	1,20	35,0	1,25	34,9	1,27	34,7	1,24	35,0	34,9	1,24	0,03	2,1
A08	1,36	50,3	1,41	50,9	1,35	50,7	1,32	50,5	1,40	50,3	50,5	1,37	0,04	2,7
A08	1,63	65,5	1,43	65,7	1,46	65,8	1,47	65,7	1,64	65,8	65,7	1,52	0,10	6,5
C08	1,47	35,0	1,40	35,1	1,57	35,3	1,37	34,9	1,54	35,1	35,1	1,47	0,09	5,9
C08	1,67	51,0	1,62	50,5	1,66	50,4	1,69	50,6	1,55	50,6	50,6	1,64	0,06	3,4
C08	1,83	63,8	1,90	63,5	2,06	64,3	1,85	63,4	1,91	63,5	63,7	1,91	0,09	4,7
D08	1,78	36,6	1,69	36,3	1,87	36,6	1,90	36,7	1,82	36,3	36,5	1,81	0,08	4,5
D08	2,49	47,8	2,05	47,7	2,77	48,3	2,48	48,0	1,85	48,1	48,0	2,33	0,37	16,0
D08	2,62	64,1	2,59	63,2	2,64	62,6	2,83	62,7	2,97	64,7	63,5	2,73	0,17	6,0
E08	1,17	35,8	1,10	36,1	1,37	36,5	1,34	36,4	1,17	36,3	36,2	1,23	0,12	9,6
E08	1,45	53,2	1,42	52,0	1,73	52,0	1,61	52,4	1,57	51,6	52,2	1,56	0,13	8,2
E08	1,75	63,4	2,00	63,0	1,97	64,3	1,79	63,6	2,70	63,7	63,6	2,04	0,38	18,7
E09	1,71	36,1	1,69	36,1	1,41	36,0	1,44	36,4	1,40	36,1	36,1	1,53	0,16	10,2
E09	1,42	51,0	1,67	51,6	1,64	51,2	1,58	51,1	1,46	50,8	51,1	1,55	0,11	7,1
E09	1,66	66,1	1,89	66,5	1,90	67,3	1,68	66,4	1,73	66,1	66,5	1,77	0,11	6,4
F08	1,31	36,2	1,36	35,7	1,23	35,8	1,30	36,2	1,35	35,9	36,0	1,31	0,05	4,0
F08	1,63	51,0	1,60	50,7	1,53	51,1	1,67	51,4	1,64	50,7	51,0	1,61	0,05	3,2
F08	1,93	64,7	1,79	65,7	1,75	65,8	1,72	65,7	1,91	66,0	65,6	1,82	0,10	5,3

Der Zusammenhang zwischen der mittleren Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und der Einbringdichte sowie dem Mischungsverhältnis ist weitgehend linear. Auf Basis der Daten aller durchgeführten Einzelversuche mit 2-komponentigen Mischungen und trockenem Prüfgefäß (Tabelle 5-37) wurde eine 3-D-Approximation erstellt. Der Ansatz der zu Grunde liegenden Funktion  $\mu = f(MV, \rho)$  entspricht Gleichung 7 mit  $x = MV$ ,  $y = \rho$  und  $z = \mu$ .

$$z = f(x,y) = a_1 + a_2 * x + a_3 * y \quad [7]$$

Die Koeffizienten  $a_1 - a_3$  für die untersuchten Varianten H09, A09, C09, D09 und H01 sind in Tabelle 5-39 dargestellt.

Tabelle 5-38 Koeffizienten zu den Flächenapproximationen aus Abbildung 5-68, Abbildung 5-69 und Abbildung 5-70 gemäß Gleichung 7

H01 mit	$\mu = f(MV, \rho) = a_1 + a_2 * MV + a_3 * \rho$		
Kompositpartner	$a_1$	$a_2$	$a_3$
H08	2,3689E-01	1,5303E-02	1,8466E-02
H09	1,9800E-01	1,1491E-02	2,0812E-02

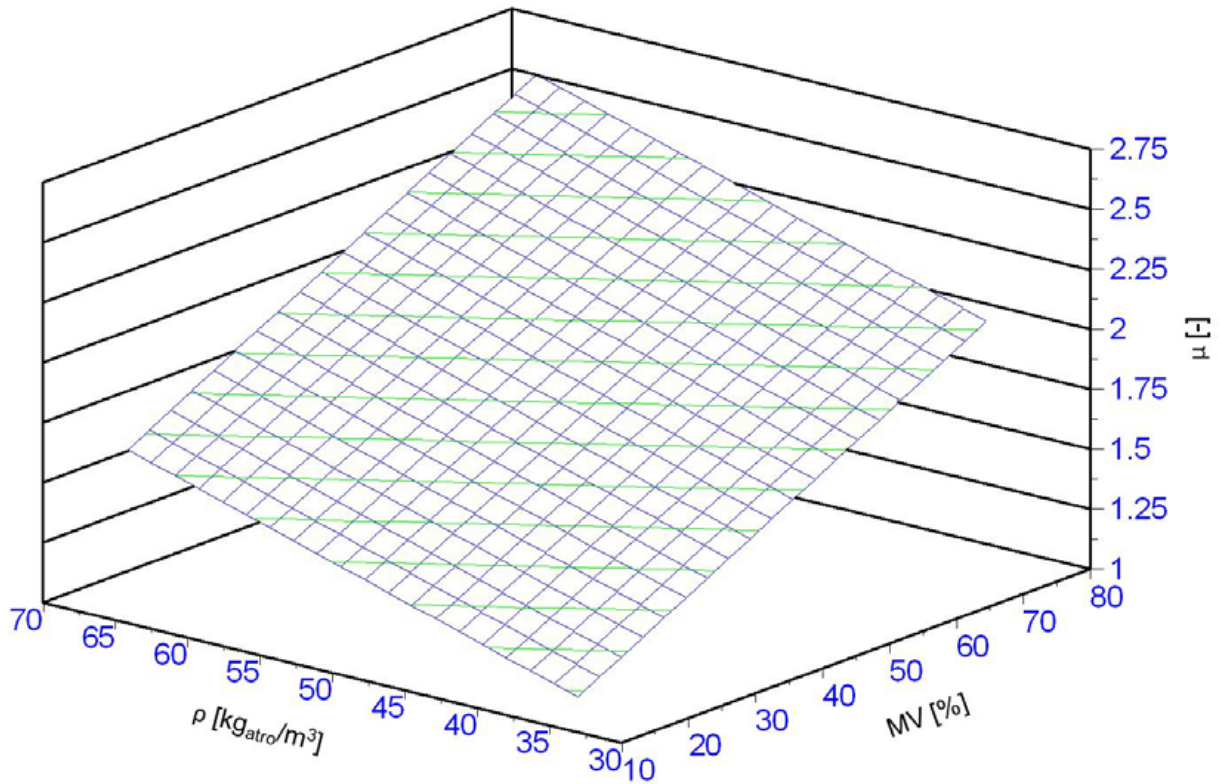


Abbildung 5-68 Funktion:  $\mu = f(MV, \rho)$  für die Mischungen mit Faserstoff H08

Leichter abzulesen ist auch hier wieder die Aufsicht auf Abbildung 5-68 unter Berücksichtigung der eingezeichneten Isolinen. Für die Mischungen mit Faserstoff H08 ist dies in Abbildung 5-69, für die Mischungen mit Altpapierflocken H09 in Abbildung 5-70 dargestellt.

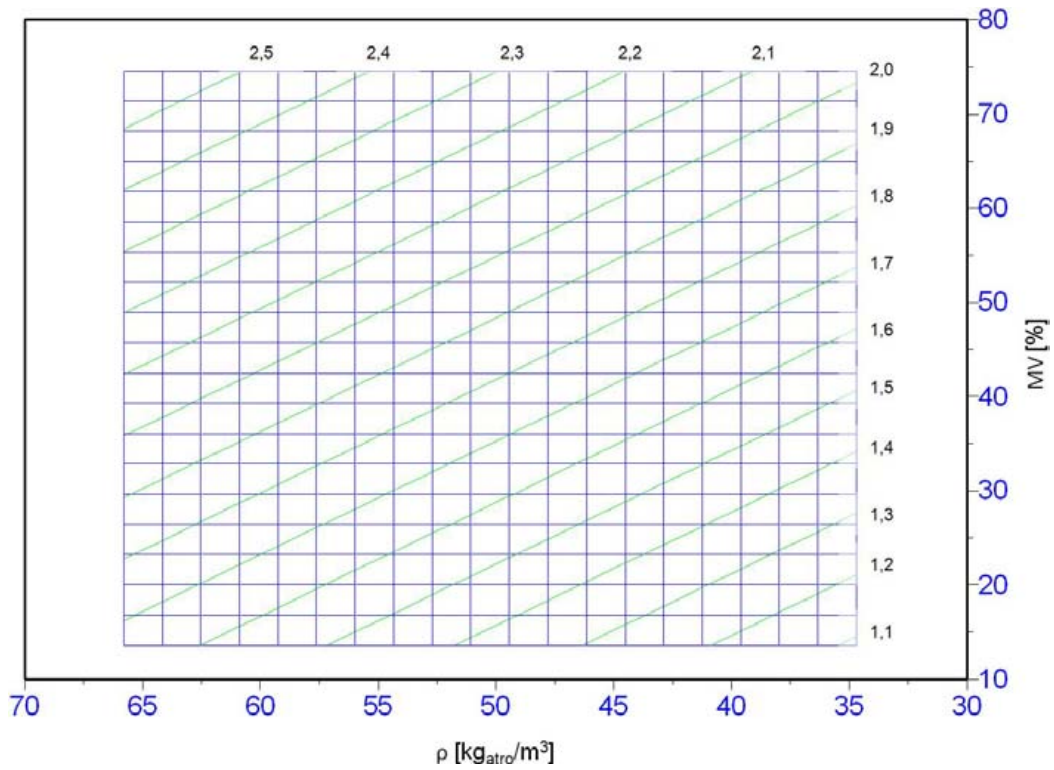


Abbildung 5-69 Isolinien aus  $\mu = f(MV, \rho)$  für die Mischungen mit Faserstoff H08 projiziert auf die Ebene  $[\rho; MV]$

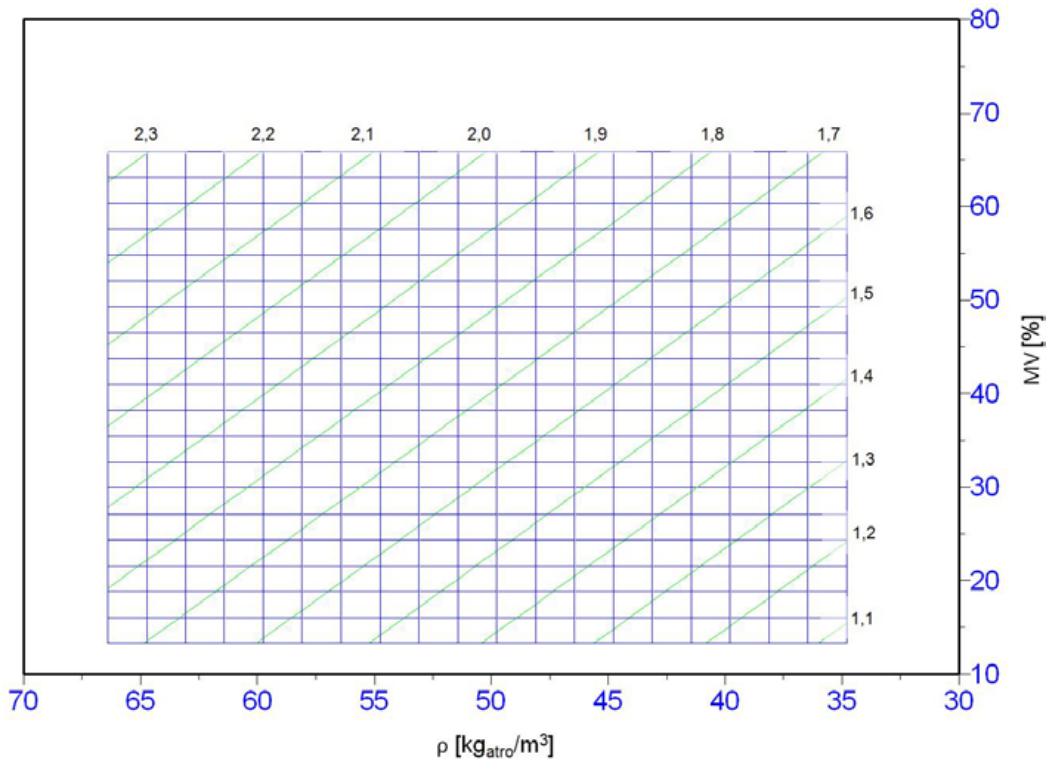


Abbildung 5-70 Isolinien aus  $\mu = f(MV, \rho)$  für die Mischungen mit Altpapierflocken H09 projiziert auf die Ebene  $[\rho; MV]$

Aus Abbildung 5-69 und Abbildung 5-70 geht hervor, dass die Abhängigkeit von Mischungsverhältnis und Einbringdichte für Mischungen zwischen FES H01 und Faserstoff H08 sowie FES H01 und Altpapierflocken H09 qualitativ ähnlich verläuft.

Ein Koeffizientenvergleich der zu Grunde liegenden Funktionen aus Tabelle 5-38 zeigt, dass bei beiden Materialsystemen eine annähernd gleiche Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von der Einbringdichte vorliegt. Die Koeffizienten  $a_3$ , welche die Steigung der partiellen Funktionen zu  $\mu = f(MV = \text{konst.}, \rho) = a_1 + a_2 * (MV = \text{konst.}) + a_3 * \rho$  beschreiben, unterscheiden sich nur geringfügig. Der Einfluss der Einbringdichte ist bei beiden Kompositssystemen also annähernd gleich ausgeprägt.

Größere Unterschiede bestehen bei der Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl vom Mischungsverhältnis. Der Koeffizient  $a_2$  ist für die Mischungen mit Faserstoff H08 als Kompositpartner ca. 33 % größer als für die Mischungen zwischen FES H01 und Altpapierflocken H09. Die Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis ist bei den Mischungen mit Faserstoff also stärker ausgeprägt als bei den Mischungen mit Altpapierflocken.

Bildet man abschließend den Quotienten zwischen den Koeffizienten  $a_2$  und  $a_3$ , so spiegelt dieser innerhalb einer Materialvariante das Verhältnis zwischen dem Einfluss des Mischungsverhältnisses und der Einbringdichte in [% /  $\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$ ] wider. Hier zeigt sich, dass bei den Mischungen mit Altpapierflocken H09 der Einfluss der Dichte gegenüber dem Einfluss des Mischungsverhältnisses ungefähr doppelt so hoch ausfällt. Für die Mischungen mit Faserstoff H08 ist der Einfluss des Mischungsverhältnisses ebenfalls schwächer als der Einfluss der Dichte. Der Unterschied ist aber mit 0,83 kleiner als bei den Mischungen mit Altpapierflocken H09.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der untersuchten 3-komponentigen Mischungen liegt im geprüften Dichtebereich in etwa auf dem Niveau der 2-komponentigen Mischungen.

Ein Vergleich zwischen den Prüfbedingungen trockenes Prüfgefäß (Tabelle 5-37) und nasses Prüfgefäß (Tabelle 5-39) zeigt, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl bei nassem Prüfgefäß im Allgemeinen niedriger ausfällt als bei trockenem Prüfgefäß. Die prozentualen Unterschiede zwischen nassem und trockenem Prüfgefäß sind für die gemessenen Varianten, auch über die unterschiedlichen Dichtebereiche hinweg, materialspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt. Eine klare Abhängigkeit lässt sich nicht feststellen.

Tabelle 5-39 Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl; Prüfgefäß nass

Mischung	V1		V2		V3		V4		V5		$\rho$	$\mu$		
	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\mu$	$\rho$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	s	V
	[·]	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	[·]	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	[·]	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	[·]	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	[·]	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	[·]	[·]	[%]
E08	1,27	35,8	1,25	36,1	1,24	36,5	1,22	36,4	1,26	36,3	36,2	1,25	0,02	1,5
E08	1,57	53,2	1,30	52,0	1,49	52,0	1,68	52,4	1,67	51,6	52,2	1,54	0,16	10,1
E08	1,63	63,4	1,62	63,0	1,60	64,3	1,63	63,6	1,57	63,7	63,6	1,61	0,02	1,5
E09	1,14	36,1	1,22	36,1	1,22	36,0	1,26	36,4	1,31	36,1	36,1	1,23	0,06	5,0
E09	1,77	51,0	1,75	51,6	1,74	51,2	1,43	51,1	1,41	50,8	51,1	1,62	0,18	11,4
E09	1,56	66,1	1,58	66,5	1,68	67,3	1,68	66,4	1,32	66,1	66,5	1,56	0,15	9,4
F08	1,19	36,2	1,20	35,7	1,20	35,8	1,19	36,2	1,24	35,9	36,0	1,20	0,02	1,6
F08	1,34	51,0	1,43	50,7	1,52	51,1	1,52	51,4	1,53	50,7	51,0	1,47	0,08	5,6
F08	1,87	63,4	1,88	62,7	1,88	62,6	1,73	62,8	1,92	62,9	62,9	1,85	0,07	4,0
A09	1,25	49,7	1,24	49,6	1,22	49,7	1,17	49,6	1,21	49,7	49,7	1,22	0,03	2,4
C09	1,46	49,3	1,29	44,6	1,38	48,5	1,31	54,3	1,37	49,5	49,2	1,36	0,07	4,9
D09	1,67	46,5	1,86	48,5	1,25	57,6	1,47	52,7	1,83	55,0	52,1	1,62	0,26	15,8

### 5.2.8 Brandverhalten (B2-Prüfung)

Die Prüfungen zum Brandverhalten wurden entsprechend der Methodenbeschreibung in 4.2.1.6 durchgeführt. Untersucht wurden die Mischungen A09i, C09i, D09i und H09i. Im Gegensatz zu den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden mit Boraten imprägnierte Altpapierflocken (Materialkennziffer H09i) verwendet. Um volumenmäßig das gleiche Mischungsverhältnis zu erhalten, wurde dem Massenanteil an Altpapierflocken der %-Anteil an Boraten zugeschlagen. Die Einbringdichte der Materialvarianten wurde mit 35, 55 und 75 kg<sub>atro</sub>/m<sup>3</sup> variiert. Vor der Prüfung wurde das Material im Klima bei 23/50 bis zur Massekonstanz klimatisiert. Der Einsatz der Drahtharfe zur volumenmäßigen Begrenzung der Materialien im Bereich der Beflammungsöffnung war bei allen Materialmischungen unkritisch. Zwar fängt die Drahtharfe nach einer gewissen Beflammungszeit auch oberhalb der eigentlichen Flammenhöhe an zu glühen, der damit verbundene Hitzeeintrag führte aber bei keiner Probe zu einer Entflammung oder sonstigen Veränderung am Material. Im Weiteren konnte während der Beflammung meist kurz nach der Entzündung eine grünliche Färbung der Flamme am Material beobachtet werden. Dies lässt sich auf die Brandschutzimprägnierung mit Borsalzen zurückführen. Die Ergebnisse der Untersuchung des Brandverhaltens finden sich in Tabelle 5-40. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle geprüften Materialvarianten das Prüfkriterium der maximalen Flammenhöhe zur Prüfung der Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 für die Klasse B2 bestanden haben.

Tabelle 5-40 Ergebnisse der Prüfung des Brandverhalten (B2-Prüfung)

Mischung	Dichte [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	Entzündung [s]					Max. Flammenhöhe [cm]					Ende Nachbrennen [s]				
		V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5
A09i	35	2	2	2	2	3	6	6	4	4	3	15	17	15	15	15
A09i	55	2	4	2	3	2	4	5	4	4	3	15	15	15	18	15
A09i	75	3	7	1	6	5	3	4	5	6	4	15	15	21	15	17
C09i	35	4	3	3	2	3	6	4	5	6	6	18	15	15	16	15
C09i	55	7	4	3	1	3	6	5	5	3	5	15	15	15	15	18
C09i	75	5	4	5	4	3	4	4	3	5	4	18	19	21	15	18
D09i	35	2	2	2	2	2	5	5	4	4	3	22	20	20	22	20
D09i	55	3	2	2	2	2	4	4	6	4	5	19	22	20	15	22
D09i	75	2	2	2	3	3	4	4	4	5	4	24	18	20	19	15
H09i	55	3	4	3	2	4	4	3	3	3	3	15	15	15	15	15

In Abbildung 5-71 sind für die untersuchten Mischungen A09i, C09i und D09i die Kriterien Entzündung [s] nach Start der Beflammung, die maximale Flammenhöhe [cm] sowie das Ende des Nachbrennens [s] (nach Zurückziehen der Flamme; entspricht dem Wert aus Tabelle 5-40 abzüglich 15 s) als Mittelwert der fünf Einzelversuche dargestellt. Es zeigen sich unterschiedlich ausgeprägte Einflüsse der Dichte und des Mischungsverhältnisses.

Die Zeitdauer bis zum Entzünden nach dem Heranführen der Flamme an das Material wird bei allen Materialvarianten länger, je größer die Einbringdichte ist. Der Einfluss ist jedoch in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses unterschiedlich stark ausgeprägt und wird umso schwächer, je größer der Anteil an FES im Gemisch ausfällt.

Bezüglich der maximalen Flammenhöhe ist, abgesehen von der Variante C09i, kein ausgeprägter Einfluss der Einbringdichte auf den Messwert zu erkennen. Die Dauer bis zum selbstständigen

Verlöschen der Flamme am Material nach dem Zurückziehen des Brenners wird mit steigender Einbringdichte bei den Mischungen A09 und C09 tendenziell länger. Das Material brennt also bei höheren Dichten länger nach. Insgesamt ist die Dauer bis zum selbstständigen Verlöschen jedoch sehr kurz.

Die absoluten Unterschiede im Brandverhalten zwischen den Materialmischungen sind zumindest bezüglich der erfassten Kriterien gering. Ein ausgeprägter Einfluss des hohen Anteils an FES in der Mischung D09i ist nicht zu erkennen. Lediglich die Nachbrennzeit ist hier im Vergleich mit den Mischungen A09i und C09i deutlich länger.

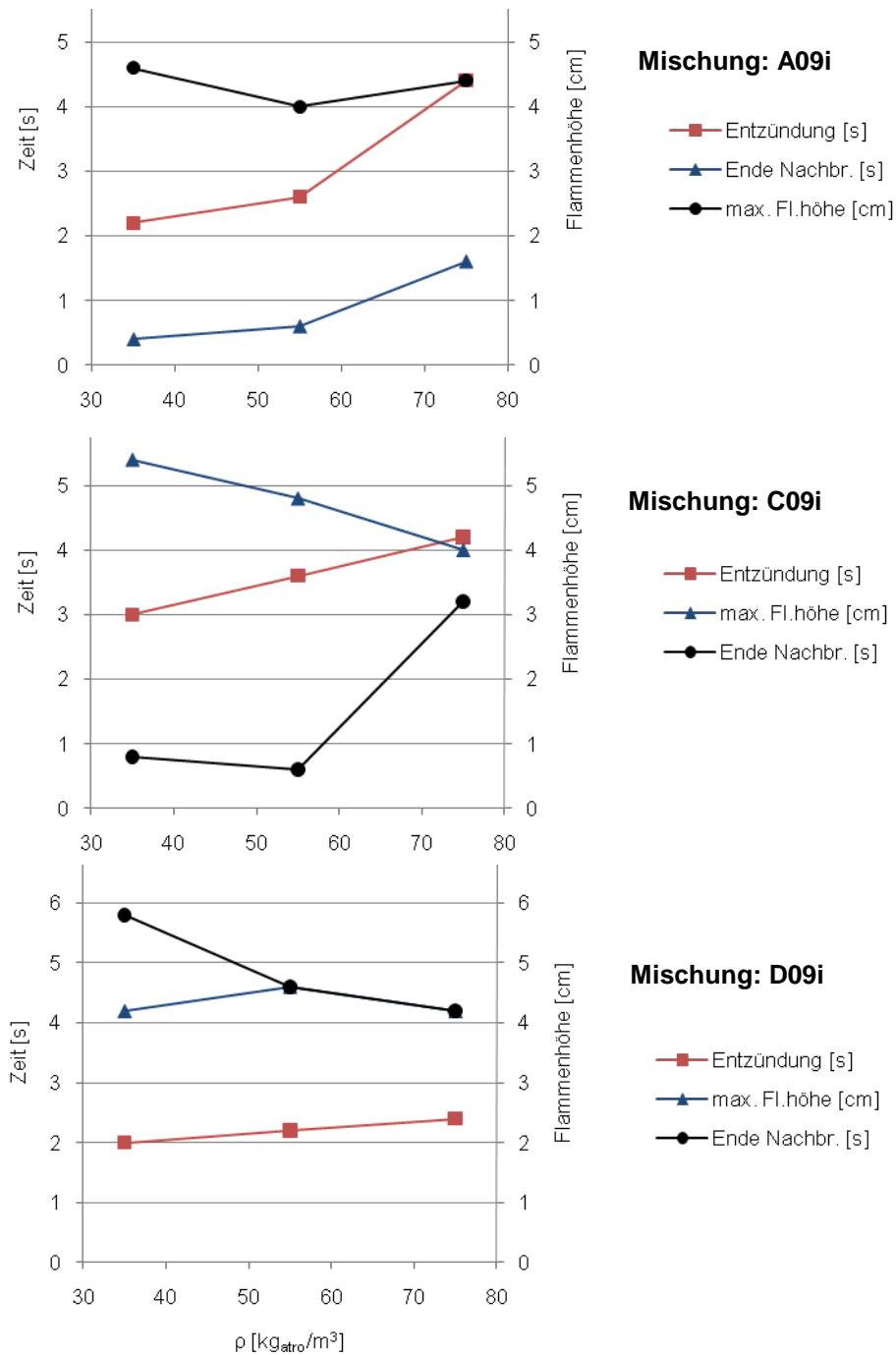


Abbildung 5-71 Mittelwerte der untersuchten Kriterien: Entzündung [s], Ende Nachbrennzeit [s], max. Flammenhöhe [cm] der untersuchten Mischungen A09i, C09i und D09i im untersuchten Dichtebereich

### 5.2.9 Versuche zur Schimmelpilzbeständigkeit

Die Schimmelpilzbeständigkeit wurde, wie in 4.2.1.10 beschrieben, bestimmt. Zur Prüfung wurden drei Materialvarianten 2-komponentiger Mischungen aus FES H01 und Altpapierflocken H09 und H09i vorgelegt. Wie bei den Untersuchungen zum Brandverhalten wurde, gegenüber den Mischungsverhältnissen mit nicht imprägnierten Altpapierflocken H09, bei den Varianten mit imprägnierten Altpapierflocken der Massenanteil der enthaltenen Borsalze von ~ 8 % berücksichtigt und dem Anteil an Altpapierflocken zugeschlagen. Die Mischungsverhältnisse bei den Materialvarianten mit imprägnierten Altpapierflocken entsprechen volumenmäßig also den geprüften Varianten mit nicht imprägniertem Material. Die untersuchten Mischungsverhältnisse sind in Tabelle 5-41 beschrieben.

Tabelle 5-41 Varianten zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit

	Mischungsverhältnis	FES	Altpapierflocken	Einbaudichte
Variante I	C09	nicht impräg.	nicht impräg.	40 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>
Variante II	C09i	nicht impräg.	imprägn.	40 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>
Variante III	D09i	nicht impräg.	imprägn.	30 kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>

Das Ergebnis zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit ist in Tabelle 5-42 dargestellt. Gegenüber der Rotbuche als Referenzprobe, die deutliches Schimmelwachstum auf mehr als 25 % der Prüffläche zeigt (Stufe 3), erzielten die imprägnierten Varianten II und III die beste Einstufung (Stufe 0). Die nicht imprägnierte Variante I erreicht die Einstufung 2b.

Tabelle 5-42 Ergebnis der Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit (PLASCHKIES 2009)

Prüfmuster	Bonitierung des Schimmelpilzbewuchses nach 28 Tagen (Mittelwert aus 5 Einzelwerten)
I	2b
II	0
III	0
Referenz Rotbuche	3
<u>Bonitierungsschema (vgl. DIN EN IEC 60068-2-10):</u>	
0	kein Wachstum bei 50-facher Betrachtung erkennbar
1	unter dem Mikroskop sind Spuren von Schimmelwachstum eindeutig erkennbar
2a	Mit bloßem Auge und/oder unter dem Mikroskop ist spärliches Schimmelwachstum sichtbar, verstreut oder auf wenige Stellen beschränkt, insgesamt auf nicht mehr als 5 % der Prüffläche
2b	Mit bloßem Auge ist Schimmelwachstum eindeutig erkennbar, mehr oder weniger gleichmäßig auf viele Stellen verteilt, insgesamt auf nicht mehr als 25 % der Prüffläche
3	Mit bloßem Auge ist Schimmelwachstum auf mehr als 25 % der Prüffläche sichtbar

Offensichtlich lässt sich durch den Mischprozess und die damit verbundene Relativbewegung zwischen den mit körnigen Borsalzen imprägnierten Altpapierflocken und dem FES eine ausreichende Imprägnierung der Frässpäne durch eine Art Abrolleffekt eines Teils der an den Altpapierfasern haftenden Borate erzielen. Ein direkter Vergleich der Varianten I und II in Abbildung 5-72 verdeutlicht das Ergebnis.



Abbildung 5-72 Probenkörper nach 28 Tagen Inkubationszeit; Variante I (oben): deutlicher Bewuchs, Variante II (unten): kein Bewuchs feststellbar

In den vergrößerten Darstellungen lassen sich Myzel und Fruchtkörper bei der bewachsenen Variante I deutlich erkennen (Abbildung 5-74 - Abbildung 5-75), die vergrößerten Aufnahmen der Varianten II und III zeigen keinen Bewuchs (Abbildung 5-76 - Abbildung 5-78).



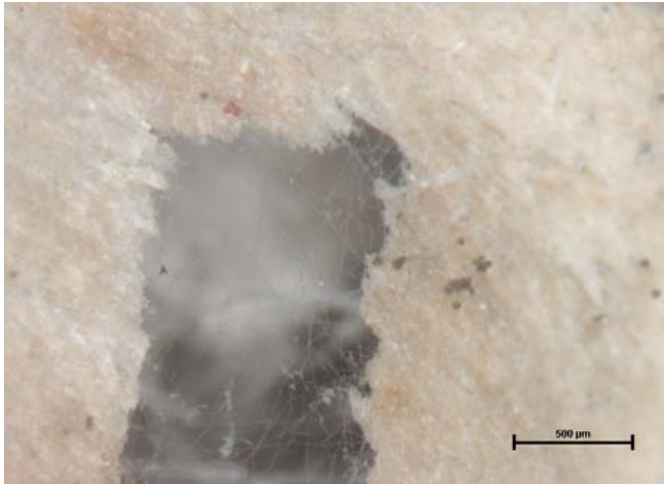


Abbildung 5-73 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Myzel und Konidienträger von *Penicillium* sp. (25-fach vergrößert)

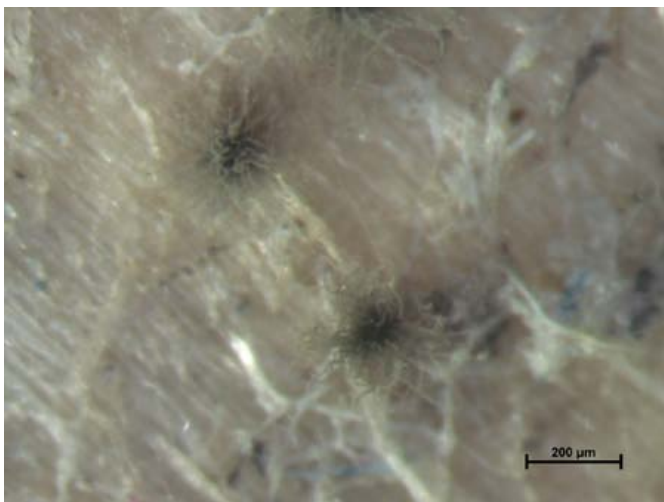


Abbildung 5-74 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Fruchtkörper Ascomata von *Chaetomium globosum* (50-fach vergrößert)



Abbildung 5-75 Variante I mit Schimmelpilzbewuchs, Ascomata von *Chaetomium globosum* (7,5-fach vergrößert)



Abbildung 5-76 Variante II; Frässpäne und Altpapierfasern ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert)



Abbildung 5-77 Variante III; Altpapierfasern ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert)

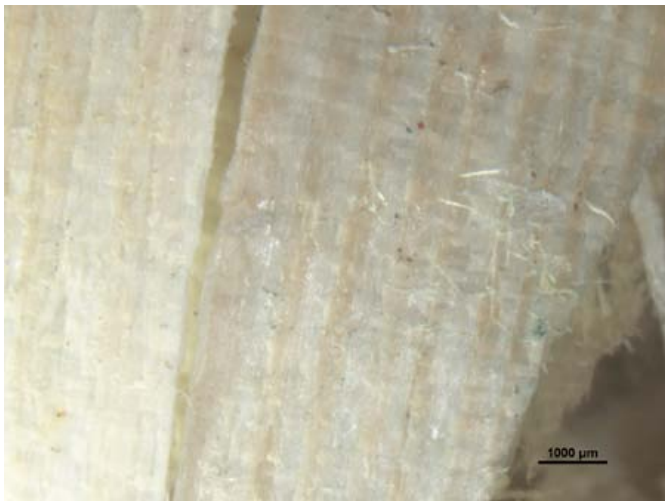


Abbildung 5-78 (Variante III; Frässpan ohne Bewuchs (7,5-fach vergrößert)

### 5.2.10 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse der Versuche mit ausgewählten Materialvarianten

Die Qualität der Mischung direkt nach dem Mischprozess ist für die untersuchten Mischungsverhältnisse aus FES H01, Faserstoff H08 und Altpapierflocken H09 gut. Sowohl die Abweichung der gemessenen Konzentration an FES in der Probe bezogen auf  $1 \text{ dm}^3$  Volumen als auch die Streuung der Konzentration der FES um den Mittelwert sind auf niedrigem Niveau. Ein direkter Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die Mischungsqualität zeigt sich nicht. Bei den Mischungen mit FES H01 und Fichte Hobelspan H02 ist durchgängig eine größere Abweichung der Ist-Konzentration von der Zielkonzentration zu beobachten. Außerdem zeigt sich hier ein deutlicher Einfluss des Mischungsverhältnisses. Höhere Anteile an FES führen zu schlechteren Mischungsqualitäten. Dies ist auf die lockere Materialmatrix und den körnigen Feinanteil innerhalb der Fichte Hobelspäne zurückzuführen. Durch Manipulationen am Material (Probenziehung, Abpackung) verschlechtert sich die Mischungsqualität materialspezifisch. Mit Mischungen aus FES H01 und Altpapierflocken H09 konnten stabile Mischungen hergestellt werden.

Ein Optimalbereich der Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien in Abhängigkeit der Rohdichte ist materialspezifisch unterschiedlich ausgeprägt. Die sehr lockere Matrix des FES zeigt bis ca.  $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Einbringdichte. In diesem Bereich lässt sich auch eine gute Korrelation zum Strömungswiderstand nachweisen.

Mischungen zwischen FES H01 und den drei untersuchten Mischungspartnern führen zu prinzipiell ähnlichen Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit vom Mischungsverhältnis und der Einbringdichte. Ausgehend von der Streudichte, besteht bei allen Mischungen zunächst eine starke Abhängigkeit von der Einbringdichte. Ab ca.  $35 - 60 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  (materialspezifisch) wird die Abhängigkeit von der Dichte schwächer. Innerhalb einer Dichtestufe steigt die Wärmeleitfähigkeit in diesem Bereich entsprechend dem Unterschied in der Wärmeleitfähigkeit beider an der Mischung beteiligter Einzelmaterialien zunächst relativ flach linear an, um ab ca. 50 % - 70 % FES mit größerer Steigung dem Wert des FES H01 als Einzelmaterial entgegenzustreben.

Bezüglich des Temperaturverhaltens der Dämmschicht bei instationären Temperaturverhältnissen wurde für die Mischungen mit Altpapierflocken festgestellt, dass hohe Anteile an FES bei niedrigen Einbringdichten zu höheren Temperaturamplitudenverhältnissen und geringeren Phasenverschiebungen führen. Mit steigender Einbringdichte verbessern sich die Wärmespeichereigenschaften aller untersuchten Materialvarianten deutlich. Zwischen den Materialvarianten gleicht sich mit steigender Einbringdichte das Temperaturamplitudenverhältnis an. Bei höheren Einbringdichten erreichen die Varianten mit steigendem Anteil an FES deutlich längere Phasenverschiebungen als die Varianten mit niedrigen Anteilen an FES.

Zwischen Strömungswiderstand und Einbringdichte besteht ein gut bestimmter exponentieller Zusammenhang. Der Strömungswiderstand korreliert mit der Wärmeleitfähigkeit nur im Bereich niedriger Dichte und wenn ein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Einbringdichte besteht. Es lässt sich kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Wärmeleitfähigkeit herstellen. Eine Umrechnung kann stets nur durch Vergleichsmessungen belegt werden und ist immer materialspezifisch.

Das Setzungsverhalten wurde mit vier prinzipiell unterschiedlichen Methoden untersucht. Die mit dem Kleinprüfstand durchgeführten Versuche sind gut reproduzierbar und bieten ein ausreichendes Differenzierungspotential. Innerhalb der Versuchsschritte (statische Belastung, Vibrationsbelastung) lassen sich gut bestimmte Zusammenhänge nachweisen. In Abhängigkeit der Mischungspartner wird mit steigendem Anteil an FES ein deutlich unterschiedliches Setzungsverhalten beobachtet. Bei

Mischungspartnern, die eine gute Einlagerung des einzelnen kommaförmig ausgeprägten Spans in ihre Materialstruktur ermöglichen, kann schon bei geringen Anteilen an FES (partielle Dichte des FES < Streudichte) ein deutlicher Einfluss auf die volumenstabile Dichte des Gemisches nachgewiesen werden. Dies funktioniert mit allen allgemein rieselfähigen oder zumindest nicht ausgeprägt agglomerierenden Materialien (z. B. Fichte Hobelspan H02, Altpapierflocken H09).

Liegt im Mischungspartner hingegen eine Materialstruktur vor, in der die Partikel des FES ihre Stützwirkung nicht entfalten können, so führen geringe Beimengungen an FES zu gegenläufigen Effekten. Diese Verhältnisse liegen dann vor, wenn der einzelne Spanpartikel, z. B. durch Agglomerierungen des Mischungspartners, nur unzureichend in die Struktur desselben integriert werden kann (z. B. Faserstoff H08). Zwar wird die partielle Dichte des einen Mischungspartners entsprechend der Substitution der Materialien untereinander niedriger, diese partielle Dichtereduktion wird aber durch die Beimengung an FES überkompensiert, sodass die Setzungsdichte konstant bleibt. Erst bei höheren Anteilen an FES (partielle Dichte des FES > Streudichte) kann sich eine verbundene Spanmatrix ausbilden, die zu einer Reduzierung der volumenstabilen Dichte führt.

Kritisch ist in diesem Zusammenhang der Begriff der Mischgüte zu sehen. Der hier gewählte Bezug auf  $1 \text{ dm}^3$  Volumen ist zum Nachweis der gleichmäßigen Verteilung des FES im Mischungspartner geeignet. Ein Maß für die Qualität der interpartikulären Einbettung der Partikel des FES kann diese Methode aber nicht liefern.

Die schwingungstechnische Analyse der durchgeführten Bauteilversuche liefert grundlegende Erkenntnisse über die Reproduzierbarkeit der Methode. Es wird gezeigt, dass die auf das Bauteil wirkenden Beschleunigungen auch bei einer steif angebundenen Gefachkonstruktion durch die Überlagerung von Schwingungen und eventuell auch durch Temperaturerhöhungen an der schwingenden Konstruktion signifikant beeinflusst werden. Gleiches gilt für die Fallversuche. Hier hängt die Höhe der maximal erzielbaren Beschleunigung stark von der Aufprallsituation und damit der exakten Führung des Gefachs beim Fallen ab. Ein deutlicher Einfluss auf die Ergebnisse der Setzungsversuche ist jedoch bei beiden Versuchsschritten nicht erkennbar. Die mit den Bauteilversuchen erzielten Setzungen korrelieren materialspezifisch gut mit den Werten, die mit dem Kleinprüfstand ermittelt wurden.

Nach den Setzungsversuchen mit dem Bauteil wurde das Dichteprofil über der Materialhöhe ermittelt. Nach den Setzungsversuchen ist die Differenz der Dichte über der Höhe des Prüfgefachs in erster Linie abhängig vom Flächengewicht des Materials. Ein gezielt eingebrachtes Dichteprofil über der Höhe des Gefachs kann zu einer signifikanten Entlastung der unteren Materialsichten führen. Die Wärmeleitfähigkeit wird hierdurch nur dann entscheidend beeinflusst, wenn die geringere Dichte im oberen Gefachquerschnitt den Bereich des Einflusses der Einbringdichte auf die Wärmeleitfähigkeit nicht unterschreitet.

Die durchgeführten Versuche zum Kompressionsverhalten zeigen, dass mit steigendem Anteil an FES die Materialmischungen weicher werden. Es wird dann weniger Kraft benötigt, das Material zu komprimieren.

Durch die Messung der Schwingungsübertragung im Material konnte nachgewiesen werden, dass die untersuchten Mischungen aus FES und Altpapierflocken mit steigendem Anteil an FES mehr Schwingung absorbieren. Unter der gewählten Versuchsanordnung ist das Übertragungsverhältnis in hohem Maße abhängig vom Verdichtungsfaktor des Materials. Bei höheren Verdichtungsfaktoren lassen sich Resonanzphänomene messen. Die Beschleunigung im Material übersteigt dann die am Prüfzylinder gemessene Beschleunigung deutlich. Ebenfalls erkennbar ist ein Einfluss der

Materialfeuchte. Mit steigender Feuchte wird die Schwingungsübertragung tendenziell besser, d. h. die Dämpfung nimmt ab.

Durch eine systematische Analyse der Daten kann für das Kriterium eines möglichst minimalen Übertragungsverhaltens der Schwingung auch ein Optimalbereich des Mischungsverhältnisses ermittelt werden. Für die untersuchten Mischungen aus FES und Altpapierflocken liegt dieser unter den beschriebenen Randbedingungen bei einem Anteil an FES von ca. 15 % - 50 %.

Die Sorptionsisothermen der beiden untersuchten Spanmaterialien zeigen keine Auffälligkeiten. Bei den imprägnierten Materialien Faserstoff H08i und Altpapierflocken H09i ist gegenüber den unbehandelten Varianten eine deutlich ausgeprägtere Hysterese zwischen Adsorption und Desorption zu beobachten. Die mittlere Sorptionsisotherme der Materialien H08 und H08i unterscheiden sich praktisch nicht. Bei den imprägnierten Altpapierflocken H09i werden bei Adsorption und Desorption gegenüber der unbehandelten Variante höhere Materialfeuchten gemessen.

Bei allen untersuchten Materialvarianten werden erwartungsgemäß niedrige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen ermittelt. Die  $\mu$ -Werte liegen zwischen 1,1 - 2,7. Der Einfluss der Dichte und des Anteils an FES ist in beiden Fällen linear. Mit steigender Dichte und steigendem Anteil an FES steigt auch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl. Die untersuchten Mischungen aus FES und Faserstoff respektive Altpapierflocken zeigen hier eine vergleichbare Abhängigkeit von der Einbringdichte. Die Abhängigkeit vom Anteil an FES in der Mischung zeigt materialspezifisch größere Unterschiede, ist aber in jedem Fall geringer als die Abhängigkeit von der Dichte.

Die Brandeigenschaften der Klasse B2 nach DIN 4102-1 werden bei den untersuchten Mischungen aus nicht imprägniertem FES und den mit Boraten imprägnierten Altpapierflocken von allen untersuchten Mischungsverhältnissen erreicht. Die Schimmelpilzuntersuchungen zeigen ebenfalls, dass durch den Mischprozess offensichtlich eine ausreichende Imprägnierung der Späne durch Abrieb an den in den Altpapierflocken gebundenen körnigen Boraten stattfindet. Die Varianten mit imprägniertem Altpapier und nicht imprägnierten Spänen zeigen auf den Fasern und Spanoberflächen keinen Schimmelpilzbefall. Es wird die beste Bonitierungsstufe 0 erreicht. Auf der Referenzvariante mit nicht imprägnierter Altpapier und nicht imprägnierten Spänen zeigt sich sowohl auf den Fasern als auch auf den Spanoberflächen ein mit bloßem Auge erkennbares gleichmäßiges Schimmelwachstum auf nicht mehr als 25 % der Prüffläche (Bonitierung 2b).

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch zweikomponentige Mischungen aus Spänen und Fasern konnten die in der Arbeit untersuchten bauphysikalisch relevanten Eigenschaften eines Partikelgemisches in der Anwendung als loser Dämmstoff gezielt verändert werden, wobei gegenläufige Effekte zwischen Wärmeleitfähigkeit und Setzungssicherheit beachtet werden müssen. Sehr gute Ergebnisse lassen sich insbesondere mit Mischungen aus FES und Altpapierflocken erzielen. Bereits bei Mischungsverhältnissen von 15 % - 50 % FES lassen sich aufgrund der guten interpartikulären Einbettung des FES in die Struktur der Altpapierflocken deutliche Reduzierungen in der volumenstabilen Dichte erreichen.

Höhere Anteile an FES ermöglichen weitere Dichtereduzierungen, gleichzeitig wird aber unabhängig vom Mischungsverhältnis bei Dichten  $< 40 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  der Wärmeschutz schlechter. Abbildung 6-1 verdeutlicht noch einmal anhand der Mischungen zwischen Altpapierflocken und FES den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und volumenstabiler Dichte. Die Abbildung implementiert dabei den Zusammenhang zwischen der volumenstabiler Dichte und dem Mischungsverhältnis (rote Linie) in die Darstellung der Isolinien der Wärmeleitfähigkeit in der Ebene Mischungsverhältnis über der Einbringdichte.

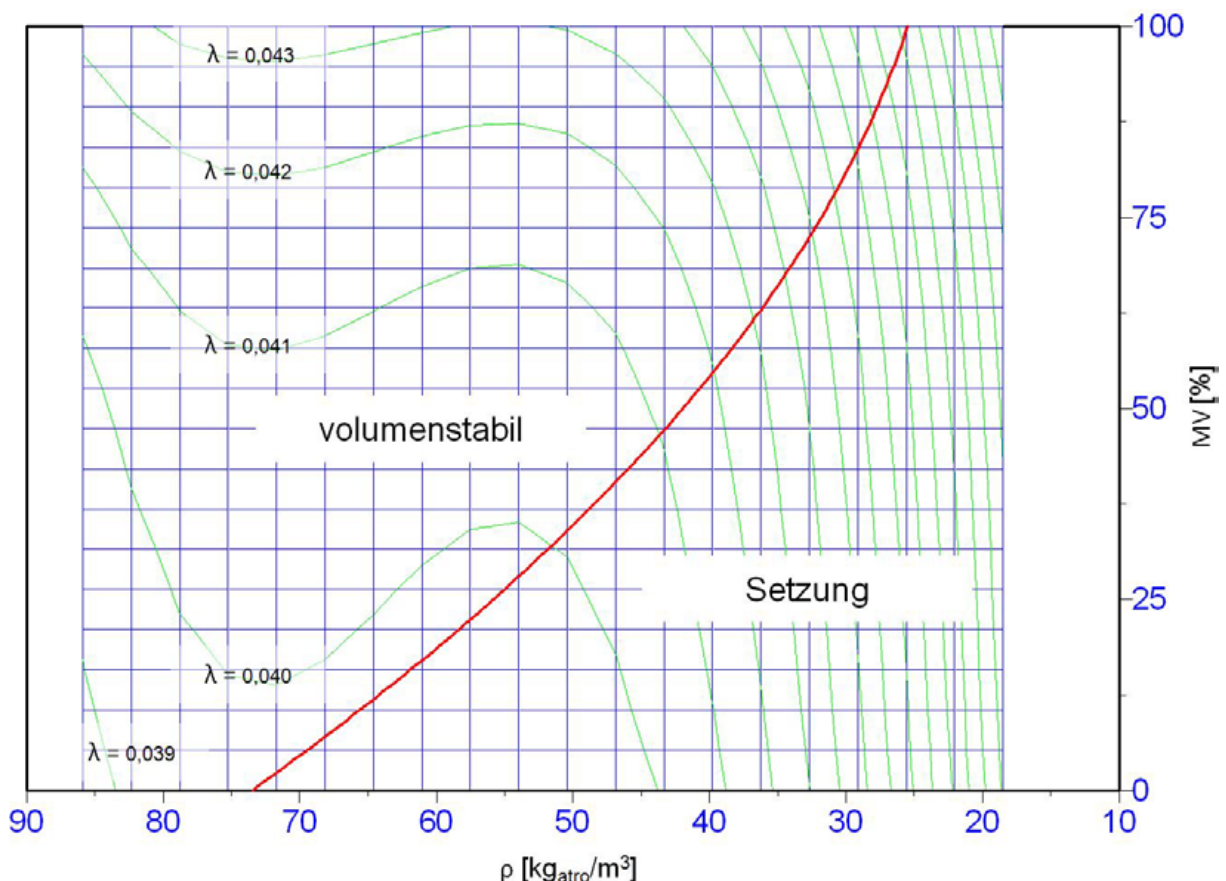


Abbildung 6-1 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und volumenstabiler Dichte für Mischungen aus FES H01 und Altpapierflocken H09

Es wird deutlich, dass bis zu einem Mischungsverhältnis von ca. 50 % FES deutliche Reduzierungen in der volumenstabilen Dichte erzielt werden können, ohne die Wärmeschutzeigenschaften des Kompositdämmstoffs gegenüber den Altpapierflocken als Einzelmaterial maßgeblich zu verschlechtern. Welches Mischungsverhältnis letztlich gewählt wird, hängt von dem gewünschten Eigenschaftsprofil des Dämmstoffs und auch von den Kostenstrukturen ab.

Bei einer Umsetzung in die industrielle Praxis ist, in Abhängigkeit von der Sensibilität der jeweiligen Eigenschaft auf das Mischungsverhältnis, eine Überwachung der Mischgüte und die Definition von zulässigen Schwankungen nötig, um eine gleichbleibende Produktqualität zu garantieren. Dies betrifft auch die Mischrezepturen. Die Füllung der Hohlräume einer stützenden Matrix mit einem zweiten Material bedingt ein volumenbezogenes Mischungsverhältnis, d. h. z. B. einen Bezug der Masse auf die Streudichte. Produktionstechnische Schwankungen der Partikelmorphologie bei den FES und beim Füllstoff können in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses zu ungefüllten Hohlräumen in der Materialstruktur führen. Unter diesem Aspekt sind hohe Anteile an FES ungünstiger.

Auch die beschriebenen dreikomponentigen Mischungen führen zu leistungsfähigen Kompositdämmstoffen. Die Überwachung der Mischgüte und die materialspezifische Anpassung der Mischrezepturen ist aber gegenüber den zweikomponentigen Mischungen weiter erschwert. Unter dem Einsatz von kostengünstigen Spansortimenten könnten dreikomponentige Mischungen wirtschaftliche Vorteile bringen.

Untersuchungsbedarf besteht noch bezüglich einer Bewertung der Qualität der interpartikulären Einbettung der Späne in die Materialstruktur des Kompositpartners, um die Nutzung alternativer Kompositpartner als Füllstoff abschätzen zu können, ohne systematische und zeitaufwändige Reihenuntersuchungen zur Setzung der Mischungsvarianten durchführen zu müssen. Vor der industriellen Umsetzung müssen außerdem noch Versuche zur Einbringung der Kompositmaterialien in das Wandgefach durch Stopfen und Einblasen durchgeführt werden. Hierbei sind insbesondere die verfahrenstechnischen Parameter zu bestimmen, welche keine Schädigung der FES verursachen, um die Einbringung entsprechend materialgerecht gestalten zu können. Im Weiteren müssen auch Separierungseffekte und die Verteilung der Mischgüte im Gefach untersucht werden.

Methodisch sind die durchgeführten Versuche zur Schwingungsübertragung im Material zur Entwicklung von Materialmischungen mit hohem Dämpfungspotential interessant. Das angewendete Messprinzip sollte dabei in reale Gefache eingebaut werden, um auch die Frage nach einem realistischen Belastungsniveau zur Prüfung der Volumenstabilität von losen Dämmstoffen weiter untersuchen zu können. In diesem Zusammenhang sollten außerdem Schwingungsbelastungen an einem Wandgefach und im Material in unterschiedlichen Bau- und Nutzungsphasen (Transport, Montage, Nutzung) erfasst und untersucht werden.

## 7 Zusammenfassung

Durch eine Kombination unterschiedlicher Partikelstrukturen sollte ein loser Dämmstoff auf Holzbasis entwickelt werden, der sich durch eine hohe Volumenstabilität bei gleichzeitig guten Wärmeschutzeigenschaften auszeichnet. Die hohe Volumenstabilität sollte durch einen speziell hergestellten federelastischen Frässpan (FES) erzielt werden, der durch eine definiert geschnittene, flächige und leicht gekrümmte Spanmorphologie eine großvolumige, federelastische Matrix ausbildet, die bereits bei geringen Dichten gegenüber statischen und dynamischen Belastungen stabil bleibt. Die Hohlräume sollten von einem Kompositpartner ausgefüllt werden, der gute Wärmedämmeigenschaften gewährleistet. Als FES wurde eine am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, speziell für diese Anwendung entwickelte Spanform verwendet.

Zur Evaluation geeigneter Mischungspartner wurden in einem breit angelegten Material- und Methodenscreening unterschiedliche Span- und Faserstoffsportimente auf die prinzipielle Mischbarkeit und auf ausgewählte Eigenschaften, hauptsächlich Wärmeleitfähigkeit und Setzungsverhalten, untersucht. Die großen Unterschiede der untersuchten Materialien hinsichtlich Partikelmorphologie und Streudichte erforderten die Entwicklung eines geeigneten Kurzprüfverfahrens, um unter definierten Randbedingungen die Setzungseigenschaften zu bestimmen. Auf Basis der durchgeführten Versuche wurden drei Materialien (Hobelspäne, thermomechanischer Refinerfaserstoff, Altpapierflocken) ausgewählt, mit denen Versuche mit materialspezifisch zwei- und dreikomponentigen Mischungen durchgeführt wurden.

Die weiterführenden Versuche zum Setzungsverhalten, insbesondere Bauteilversuche, bei denen der Erfassung der Belastungscharakteristik des Prüfstandes besondere Aufmerksamkeit zukam, wurden mit den Werten aus dem Kurzprüfverfahren verglichen.

Weiter wurde eine neu entwickelte Methode zur Untersuchung der Übertragung der am Prüfgefäß gemessenen Schwingung in das Material und eine Methode zur Untersuchung des Kompressionsverhaltens angewendet.

Die Wärmeleitfähigkeit zwei- und dreikomponentiger Mischungen wurde mit dem Zweiplattenverfahren nach DIN 52612 gemessen.

Mit der Bestimmung des Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) und der Phasenverschiebung ( $\varphi$ ) in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und der Einbringdichte, wurde bei zweikomponentigen Mischungen aus Frässpänen und Altpapierflocken auch das wärmeschutztechnische Verhalten bei instationären Temperaturverhältnissen untersucht.

Ebenfalls untersucht wurde das hygroskopische Verhalten. Hier wurden Sorptionsisothermen ermittelt und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl bestimmt.

Zum Brandverhalten wurden Prüfungen zur Normalentflammbarkeit nach DIN 4102-1 durchgeführt.

Die Schimmelpilzbeständigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 60068 bestimmt.

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen können folgende Aussagen zusammengefasst werden:

- Durch Mischungen aus FES und anderen, beispielsweise faserstoffartigen Materialien kann die volumenstabile Dichte des Kompositmaterials gegenüber der volumenstabilen Dichte des Kompositpartners als Einzelmaterial reduziert werden.



- Der Einfluss des Mischungsverhältnisses zwischen den beteiligten Mischungspartnern auf die volumenstabile Dichte des Kompositmaterials ist nicht zwangsläufig linear. Der Verlauf der Funktion der volumenstabilen Dichte in Abhängigkeit des Mischungsverhältnisses kann materialspezifisch konkav oder konvex ausgeprägt sein.
- Bei einer guten Einbettung der Einzelpartikel des FES in die Struktur des Mischungspartners (Bsp.: FES und Altpapierflocken) kann die Setzungsdichte des Kompositmaterials bereits bei geringen Anteilen an FES deutlich reduziert werden; die Abhängigkeit der Setzungsdichte vom Mischungsverhältnis ist konvex. Bei Kompositpartnern, die keine gleichmäßige Einlagerung der FES in die Materialstruktur zulassen (Bsp.: FES und TMP), lässt sich eine signifikante Reduzierung der Setzungsdichte erst bei vergleichsweise hohen Anteilen an FES erreichen; die Abhängigkeit der Setzungsdichte vom Mischungsverhältnis ist konkav.
- Das Verhältnis zwischen der am Probenhalter gemessenen Beschleunigung und der in der Materialstruktur gemessenen Beschleunigung wird durch das Mischungsverhältnis zwischen FES und dem Kompositpartner beeinflusst. Unter den Randbedingungen des gewählten Prüfaufbaus weist dieses Übertragungsverhältnis für Mischungen aus FES und Altpapierflocken zwischen ca. 15 % - 50 % FES einen Minimalbereich auf.
- Die Wärmeleitfähigkeit des Kompositmaterials lässt sich als Funktion der zwei Variablen 'Mischungsverhältnis' und 'Einbringdichte' darstellen.
- Die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei gleicher Einbringdichte aber variierenden Mischungsverhältnissen zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit der Mischungen stets zwischen den Werten der beiden an der Mischung beteiligten Einzelmaterialien liegt. Mit aufsteigender Einbringdichte ist zunächst ein starker Einfluss der Einbringdichte auf die Wärmeleitfähigkeit zu beobachten, der bei weiter steigender Einbringdichte abnimmt, bis er ein nahezu konstantes Niveau erreicht.
- Bei Einbringdichten ab ca.  $50 \text{ kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3$  lassen sich bei Mischungen aus FES und Altpapierflocken mit einem niedrigen Anteil an FES, bei vergleichbarem Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) gegenüber den Altpapierflocken als Einzelmaterial bessere Phasenverschiebungen nachweisen. Mit steigender Einbringdichte werden die Phasenverschiebungen der Mischungen mit zunehmendem Anteil an FES gegenüber den Altpapierflocken als Einzelmaterial weiter verbessert und auch die TAV der Mischungen mit einem höheren Spananteil gleichen sich weitgehend an.
- Die untersuchten Materialmischungen sind entsprechend dem Wasserdampfdiffusionswiderstand der verwendeten Einzelmaterialien durchgehend als diffusionsoffen zu bezeichnen. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  liegt bei allen Materialmischungen in einem Bereich von  $\mu = 1 - 2$ .
- Bezüglich des Sorptionsverhaltens kann festgestellt werden, dass die mit Boraten oder Ammoniumphosphaten imprägnierten Materialvarianten eine ausgeprägtere Hysterese aufweisen und im Bereich hoher relativer Luftfeuchtigkeit sorptiver sind als die entsprechenden nicht imprägnierten Materialvarianten.
- Es konnte festgestellt werden, dass mit Mischungen aus FES und brandschutzimprägnierten Altpapierflocken die Anforderungen der Klasse B2 nach DIN 4102-1 auch ohne eine gesonderte Imprägnierung der Späne erreicht werden können.

- Auch die Untersuchungen zum Schimmelpilzbefall bestätigen die Praxistauglichkeit der untersuchten Kompositmaterialien aus nicht imprägnierten FES in Mischung mit imprägnierten Altpapierflocken. Die Variante D09i mit einem nicht imprägnierten FES-Anteil von ca. 66 % in Mischung mit imprägnierten Altpapierflocken erreichte die beste Bonitierungsstufe. Offensichtlich wird durch die Mischung eine gewisse Imprägnierung der Späne durch Abrieb an den mit körnigen Boraten imprägnierten Altpapierflocken erreicht.

Durch zweikomponentige Mischungen aus Spänen und Fasern können die beschriebenen Materialeigenschaften gezielt verändert werden. Eine Verbesserung der Volumenstabilität durch die Beimengung von FES zieht allerdings in jedem Fall auch Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit nach sich, die sich materialspezifisch und dichteabhängig zwischen den Werten der beiden an der Mischung beteiligten Einzelmaterialien einstellt.

Betrachtet man die untersuchten Kompositmaterialien im Vergleich mit herkömmlichen Schüttdämmstoffen (z.B. Altpapierflocken), die bei fachgerechter Verarbeitung und der Einbringung einer ausreichenden Dichte ebenfalls setzungssicher sind, ausschließlich unter dem Aspekt der Wärmedämmeigenschaften, so bieten die untersuchten Materialgemische keine absoluten Verbesserungen. Dennoch sind Mischungen aus FES und anderen Schüttdämmstoffen im Hinblick auf eine effiziente Materialausnutzung von ökologischem und ökonomischen Interesse. Durch die Möglichkeit, mit Beimengungen von FES die volumenstabile Einbringdichte zu reduzieren, bei gleichzeitig akzeptierbaren Einbußen in der Wärmeleitfähigkeit, kann der Materialeinsatz zur Dämmung deutlich gesenkt werden, was vor dem Hintergrund eines ressourcenschonenden Produkteinsatzes und der Kosteneffizienz des Dämmstoffs eine anzustrebende Entwicklung darstellt. Welches Mischungsverhältnis letztlich gewählt wird, hängt unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet von den Entstehungskosten der Späne ab, die entweder beim Dämmstoffhersteller oder in einem anderen Holzverarbeitenden Betrieb produziert werden müssen sowie von dem Aufwand, den das entsprechende Dosier- und Mischverfahren erfordert.

## 8 Literaturverzeichnis

- ABM (1999): B2-Prüfung von Einblas- und Schüttdämmstoffen. ABM-Sitzung Nr. 49, Beschluss Nr. 11
- Achtziger J., Cammerer J. (1990): Untersuchung des anwendungsbedingten Einflusses der Feuchtigkeit auf den Wärmetransport durch gedämmte Außenbauteile. Bauphysik 12, H. 2, 42 - 46
- Albrecht W. (1997): Anwendungsgebiete, Eigenschaften und Klassifizierung von "alternativen" Wärmedämmstoffen. Bauphysik 19, H. 4, 121-125
- Alex W. (2007): Krümelkunde (Skriptum). <http://www.alexweingarten.de/skripten/kruemel.pdf> (Stand 16. November 2007)
- Anonymus (1969): Methode zur Bestimmung der Streudichte. ZHS 19/117. Forschungsinstitut für Holztechnologie Dresden.
- Anonymus (1978): Technisches Anleitungsblatt für die Holzindustrie 1978/2, herausgegeben vom Forschungsinstitut für Holztechnologie Dresden. Charakterisierung von Feinstpartikeln. Holztechnologie 19, 2, 113-11
- Anonymus (2005): Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energiewirtschaftliche Referenzprognose (Energierport IV). Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Prognos AG (2005), Köln/Basel
- Anonymus (2006a): Hohe Nachfrage nach Energiesparhäusern. Holzzentralblatt, Ausgabe 25, 747
- Anonymus (2006b): Dämmstoffmarkt verharrt auf mäßigem Niveau. Holzzentralblatt, Ausgabe 15, 437
- Anonymus (2006c): Industriell gefertigte Lehmbauplatte. Bauen + Holz (Beilage zum HZB), 9. Juni 2006, 14
- Anonymus (2010): Holzzentralblatt. Kurznachrichten, 10.02.2010
- Autorenkollektiv (1990): Lexikon der Holztechnik. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig
- Autorenkollektiv (2003): Holzlexikon. 4. Auflage, DRW-Verlag
- Arnold D. (1986): Vorteile digitaler Bildverarbeitung für die Spananalyse. Holz Roh- Werkst, 7, 249-252
- Bader H. (2005): Etude visant à améliorer les propriétés des panneaux en bois massif multicouches en optimisant leur constitution. Travail de Diplôme: 66. (zitiert in Foglia et al. 2006)
- Bachmann H., Ammann W. (1987): Schwingungsprobleme bei Bauwerken: durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Verlag International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987ISBN3857480513, 9783857480515
- Baehr H.D., Stephan K. (2008): Wärme und Stoffübertragung. 6. Auflage, Springer Verlag
- Björk H., Rasmuson A. (1995): Moisture equilibrium of wood and bark chips in superheated steam. Fuel, Vol. 74, No. 12, 1887 - 1890
- Bläsi W. (2002): Bauphysik. 4. Aufl. - Haan-Grüten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer
- Bohenschäfer W., von Hirschhausen C., Ströbele W., Treusch J., Wagner U. (2005): Nachhaltige Energiepolitik für den Standort Deutschland, Anforderungen an die zukünftige Energiepolitik. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Berlin

- Böhner G. (1996): Überlegungen und Ergänzungen zum "Keylwerth-Diagramm". Holz Roh- Werkst, 54, 2, 73 - 79
- Buschmann R. (2003): Informationsbroschüre: Umweltverträglichkeit von Gebäudedämmstoffen. Katalyse Institut für angewandte Umweltforschung, Köln 2003, Herausgegeben vom Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein
- Bühlmann P. (2001): Naturdämmstoffe auf dem Vormarsch. Mikado 6/2001, 62 - 65
- Cammerer J.S. (1938): Die wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Holz und holzhaltigen Baustoffen. Holz Roh- Werkst, 6, 209 - 213
- Cammerer W.F. (1970): Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen. European Holz Roh- Werkst, 28, 11, 420 - 423
- Cammerer W.F. (1987): Der Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen. Bauphysik 9, H. 6, 259 - 266
- Cammerer J., Achtziger J. (1992): Verminderung des Wärmeschutzes von Außenwandkonstruktionen mit zusätzlicher Wärmedämmschicht durch Wasserdampfdiffusionsvorgänge. Bauphysik, H. 5., 129 - 130
- Cammerer W.F. (1995): Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Auflage, Berlin
- Cammerer J., Spitzner M. H., Treiber G., Schmitt H., Heinz G. (2003): Settling and acceptable size of gaps in loose-fill thermal insulation in walls. In: Carmeliet J., Hens H.; Vermeir G. (Hrsg.), Research in Building Physics; Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics 14. - 18.09.2003, Leuven, Belgien; S. 545-553. Lisse/NL: A.A.Balkeema
- Chen Z., Lamb F.M. (2002): Theoretical equilibrium moisture content of wood under vacuum. Wood and Fiber Science, 34, 4, 553 - 559
- Coppers M., Schütz S. (2005): Optische Online-Partikelanalyse als Produktionsüberwachung im industriellen Einsatz. Aufbereitungs Technik 46, Nr. 7, 42 - 47
- DIBT (1997a): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Wärmedämm-Schüttung aus Hobelspänen "Climate Chips". Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z-23.11-1104
- DIBT (1997b): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Holzfaser-Wärmedämmstoff "Ligno-Zell". Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z-23.11-1120
- DIBT (1997c): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Lose Hobelspäne als Wärmedämmstoff "Iso-Span". Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z-23.11-1132
- DIBT (1998): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Zellulosefaser-Dämmstoff "Termoträ". Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z-23.11-212
- DIBT (2003): Wood shavings in bulk to be used for thermal insulation. ETA request No. 12.01/06. Deutsches Institut für Bautechnik. Final Draft, September 2003
- DIBT (2006): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. An der Anwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus losen Hobelspänen mit Lehmumhüllung 'Jasmin'. Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z 23.11-1597
- DIBT (2007a): Europäische Technische Zulassung ETA-07/0085. Lose Hobelspäne als Wärmedämmstoff.

- DIBT (2007b): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Lose Hobelspäne als Wärmedämmstoff "Hoiz". Deutsches Institut für Bautechnik. Zulassungsnummer Z-23.16-1657
- Ebert H.P. (2002): Hitzdraht-Methode. Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Abteilung Wärmedämmung und Wärmetransport, Würzburg
- Eicke-Hennig W. (1997): Neue Dämmstoffe - (k)eine Alternative?. das Bauzentrum 9, S. 64 - 72
- Eisenhut T. (2008): Dämmstoffe aus Hobelspänen. Diplomarbeit, Hochschule Rosenheim
- Engelhardt F. (1979): Untersuchungen über die Wasserdampfsorption durch Buchenholz im Temperaturbereich von 110 bis 170°C. Holz Roh- Werkst, 37, 3, 99 - 112
- Famers G. (2003): Die Brandschutzvorschriften der neuen Musterbauordnung. Bauphysik 25, H. 3, 131 - 13
- FNR (2006): Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- FNR (2007): Daten und Fakten zu nachwachsenden Rohstoffen. Herausgeber: Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (1. Auflage)
- Foglia A., Sonderegger W., Niemz P., Bader H., Weber A. (2006): Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2004.02
- Fortuin G. (2003): Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz. Dissertation, Uni Hamburg
- Erhorn H., De Boer J., Kluttig H., Reith A. (2001): Weber 2001 Övolution. Projektstudie des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und des Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)
- Ganev S., Cloutier A., Beaugard R., Gendron G. (2003): Effect of panel moisture content and density on moisture movement in MDF. Wood and Fiber Science, 35 (1), 68 - 82
- Geiger B., Nickel M., Wittke F. (2005): Energieverbrauch in Deutschland – Daten, Fakten, Kommentare. BWK 1/2
- Gerasch W.-J. (1981): Ermittlung von Rammerschütterungen im Nahbereich der Erregung. VDI-Berichte Nr. 419
- Gertis K. (1991): Verstärkter baulicher Wärmeschutz - ein Weg zur Vermeidung der bevorstehenden Klimaveränderung. Bauphysik 13, H. 5, 132 - 137
- Granum H. (1951): Planer shavings and sawdust as insulation in buildings. Bericht Norwegian Institute of Wood and Wood Technology, Blindern, Oslo.
- Griffiths E., Kaye G. W. C. (1956): Proc. Roy. Soc., London Ser. A Bd. 104 (1923). zitiert bei Kollmann und Malmquist 1956
- Groß L. (2005): Einsatz von Kompositdämmstoffen in Bauwerken unter stoffstrom- und materialspezifischen Aspekten. Diplomarbeit, Universität Stuttgart
- Heinrich H. (2004): Abschlussbericht zur Prüfung der Dämmeigenschaften von TMP-Faserstoff unterschiedlicher Holzarten. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Bauphysik im Auftrag des Ministerium für Umwelt und Forsten, Kaiser-Friedrich-Straße 1, 55116 Mainz.

- Heinrich H., Hering B. (2003): Untersuchung der Verwendung von Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich. Abschlussbericht zum Forschungsauftrag der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern
- Heinrich H., Hering B. (2004): Holz als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung im Baubereich, gi (Heft 5), 245-257
- Heisel U. (2009): Grundlagenuntersuchungen zur Bildung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz. Ergebnisbericht zum Forschungsvorhaben HE 1656/113-1
- Heisel U., Tröger J., Groß L. (2008): Setzungsverhalten von Schüttdämmstoffen. Holztechnologie 49, 1, 39-45
- Heisel U., Tröger J., Groß L., Tremel S. (2009): Frässpäne für die Wärmeisolation - Zur Bildung von Kompositdämmstoffen auf Basis von federelastischen Frässpänen aus Holz. (Teil 1), HOB 6, 72 - 75
- Hens H. (1991): Luft- und Winddichtigkeit von geneigten Dächern: Wie sie sich wirklich verhalten. Bauphysik 13, H. 5, 151 - 152
- Herlyn J.W., Mehlhorn L. (1998): Wärmedämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen: Kennwerte, Anwendung und Feuchteverhalten. WKI-Mitteilung 714/1998, wksb 43.Jahrgang, 41, 12-19
- Herlyn J.W. (2000): Dämmstoffe - Feuchteigenschaften. Bauen mit Holz, 1, 27 - 33
- Hesch I., Hesch R. (1996): Thermobag, Wundertüte für Dämmstoffe. Mikado 1, 48 - 51
- Hölemann H. (1984): Schwel- und Glimmversuche an Baustoffen. Wksb 18/1984.
- Hölemann H., Köhler M., Mittring S., Pakleppa D., Schulze J., Wenderoth S. (1997): Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Bewertung von schwel- und glimmfähigen Baustoffen. Vfdb 1/97
- Holzmann G. (2006): Wohlfühlen mit dem Naturdämmstoff Schilf. Der Bausachverständige, 5
- Hosser D. (1986): Erdbebenversuche mit Brandschutzeinrichtungen für Kernkraftwerke. VFDB 3, 142 - 146
- Kaiser A. (2001): Energiebilanzierung von Dämmstoffen. Diplomarbeit, Uni Freiburg, 2001
- Kisseloff P. (1969): Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung in Holz. Holz Roh- Werkst, 27, 7, 245-253
- Kießl K., Möller U. (1989a): Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz- und Holzwerkstoffen. Holz Roh- Werkst, 47, 8, 317 - 322
- Kießl K., Möller U. (1989b): Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz- und Holzwerkstoffen. Holz Roh- Werkst, 47, 9, 359 - 363
- Kießl K., Krus M., Künzel H. (1993): Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Praktische Anwendungsbeispiele. Bauphysik 15, H. 2, 61 - 67
- Klement E., Bock H.M. (1998): Normalentflammbarkeit von Baustoffen nach DIN 4102-1; Einflüsse des Brenngases und der Austrittsstabilisatorführung des Brenners im Hinblick auf eine europäische Normung. Bauphysik 20, H. 2, 37 - 44
- Kloos T. (1997): Prüfzeugnis über die Ergebnisse von Zulassungsprüfungen zur Vorlage beim Deutschen Institut für Bautechnik. Berlin. MPA NRW. Nr. 42 0609 0 96

- Klopper H. (1983): Bauphysikalische Betrachtungen zum Wassertransport und Wassergehalt in Außenwänden. Aachener Bausachverständigentage, Feuchtigkeitsschutz und Feuchtigkeitsschäden an Außenwänden und erdberührten Bauteilen, 21 - 37
- Kollmann F. (1959): Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung. Holz Roh- Werkst, 17, 5, 165 - 171
- Kollmann F. (1963): Zur Theorie der Sorption. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Band 29, Düsseldorf
- Kollmann F., Malmquist L. (1956): Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen. Holz Roh- Werkst, 14, 6, 201 - 204
- Kollmann F., Schneider A. (1958): Einrichtungen zur praxisnahen und wissenschaftlich exakten Messung von Sorptionseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Holz Roh- Werkst, 16, 117 – 122
- Kollmann F., Schneider A. (1964): Untersuchungen über den Einfluß von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200°C und von Wasserlagerung bis 100°C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1399, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen
- Königstein T. (2009): Ratgeber energiesparendes Bauen. 4. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag
- Krus M. (2005): Teil „Feuchteschutz“ des Skriptum zur Vorlesung „Konstruktionslehre II“ der FH-Rosenheim
- Kühlmann G. (1962): Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygrokopischen Bereich. Holz Roh- Werkst, 20, 7, 259 - 270
- Künzel H. (1982): Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 3, 101 - 107
- Künzel H. (1989): Wie ist der Feuchteeinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen unter heutigen Bedingungen zu bewerten?. Bauphysik 11, H. 5, S. 185 - 189
- Künzel H., Kießl K. (1990): Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. Bauphysik 12, H. 5, S. 140 - 144
- Kuchling H. (2001): Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. 17. Auflage
- Lehmann W. (2004a): Dämmstoffe. Informationsschrift des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Merkblatt 22
- Lehmann W. (2004b): Baubiologie und Wärmeschutz. Informationsschrift des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Merkblatt 27
- Lindemann G. (1994): Neue Dämmstoffe - neue Märkte. Isoliertechnik 4/94, 14 - 26
- MBO (2002): Musterbauordnung. Fassung November 2002
- Mersmann A., Kind M., Stichlmair J. (2005): Thermische Verfahrenstechnik. Grundlagen und Methoden, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Meyr K. (2003): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz loser Dämmstoffe aus Holz. Masterarbeit, FH Rosenheim

- Murphy D. (1998): Eignung unterschiedlicher biogener Fasern für die Wärmedämmung. Seminar: Bau- und Dämmstoffe aus Hanf: Technik, 09.12.1998 in Bremen
- Müller-Reinholz A., Woest A. (2004): Abschlussbericht BMBF-Verbundprojekt: Teilvorhaben Projektleitung und Koordination im Verbundvorhaben: Produktion loser Dämmstoffe aus Holzspänen und -fasern als höherwertige stoffliche Nutzung von Industrierestholz und Schwachholz .
- Narayanamurti D. (1936): Versuche über die Feuchtigkeitsbewegung in Holz und anderen Körpern beim Trocknen und über das Wärmeleitvermögen feuchten Holzes. Beih. Verfahrenstechnik 2, Z. VDI 1936. zitiert bei Kollmann und Malmquist 1956
- Nelson R.M. (1983): A model for sorption of water vapor by cellulosic materials. Wood and Fibre Science 15 (1) : 8 - 22
- Nilsson T. (1996): Persönliche Mitteilungen. Swedish University of Agricultural Science, Uppsala. zitiert bei Vogel 1999
- Noack D. (1959): Beitrag zur Sorption des Holzes im Bereich höherer Temperaturen und Wasserdampfdrücke. Holz Roh- Werkst, 17, 5, 205 - 212
- Paproth R.G., Weiß O. (2001): Leitfaden ökologische Dämmstoffe. Wärmedämmung für Wohngesundheit und Energieeinsparung. Herausgeber: Nabu Bundesverband Naturschutzbund Deutschland e.V.
- Plaschkies K. (2009): Prüfbericht 229025. Institut für Holztechnologie Dresden
- Popper R., Niemz P., Eberle G. (2004): Untersuchungen zu Diffusionsvorgängen in mehrschichtigen Massivholzplatten. Holz Roh- Werkst, 62, 4, 253 - 260
- Popper R., Niemz P., Eberle G. (2005): Untersuchungen zum Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen. Schweiz. Z. Forstwes. 156, 3 - 4, 100 - 103
- Scheidung W. (2000): Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff. Holz Roh- Werkst 58, 177 – 181
- Scheidung W., Dube H. (2001): Dämmstoffe aus Extruder-Holzfaserstoff. Holzzentralblatt, 124, 1542
- Schmidt Ch. (1996): Experimentelle Untersuchungen zur Bewertung von Hobelspänen für Dämmschüttungen. Diplomarbeit, FH Rosenheim
- Schneider A. (1960): Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen. Holz Roh- Werkst, 18, 7, 269 – 272
- Schneider A., Engelhardt F. (1977): Vergleichende Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit von Holzspan- und Rindenplatten. Holz Roh- Werkst, 35, 7, 273 - 278
- Schneider A. (1978): Orientierende Vergleichsuntersuchungen über das Sorptionsverhalten mitteleuropäischer Baumrinden und Hölzer. Holz Roh- Werkst, 36, 6, 235 - 239
- Scholz R. (2000): Sorptionseigenschaften von organischen und anorganischen Dämmstoffen. Diplomarbeit, TU München
- Schulze H. (1999): Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Holzbauhandbuch Reihe 4, Teil 5, Folge 1, Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der DGfH



- Schunk C. (2009): Untersuchungen zu dämmstoffrelevanten Materialeigenschaften spanmorphologisch optimierter Frässpäne ausgewählter Holzarten. Diplomarbeit, TU München
- Schunk C., Tremel S., Tröger F. (2009): Lose Dämmstoffe aus Holz – Wärmeleitfähigkeit von speziell hergestellten Frässpänen ausgewählter Holzarten. Eur J Wood Prod, 67, 4, S. 487 - 488
- Schwarz B. (1999): Praxisuntersuchungen an Dämmstoffen aus Holz. Tagungsband Dämmstoffe aus Holz, 11. Münchener Holzkolloquium, 19 - 27
- Schwister K. (2007): Taschenbuch der Verfahrenstechnik. Herausgeber: Fachhochschule Düsseldorf, 3. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
- Seunig G.W. (2004a): Feuchte Wände und Schimmelbildung. Informationsschrift des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Merkblatt 08
- Seunig G.W. (2004b): Raumklima und Behaglichkeit. Informationsschrift des Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. Merkblatt 10
- Seifert J. (1972): Einflüsse auf das Sorptionsverhalten der Holzwerkstoffe. Holz Roh- Werkst, 30, 3, 99 - 111
- Simpson W.T. (1973): Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Wood and Fiber Science 5 (1), 41 - 49
- Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J., Siemieniowska T. (1984): Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. IUPAC Recommendations, Pure Appl. Chem. 57, 603 - 619
- Skjelmerud H. (1960): Use of sawdust and other mill residues. The Lumberman 11, 62 - 63
- Sonderegger W., Niemz P. (2009): Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials. Eur J Wood Prod, 67, 3, 313 - 321
- Splittgerber H. (1975): Über die Erschütterungsimmissionen durch Straßen- und Schienenverkehr. Int. Verkehrswesen 27, 5, 245 - 248
- Spitzner M.H. (2001): Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit geschäumter Massen. Wissenschaft, Band 2. Fraunhofer IRB-Verlag.
- Stieß M. (2009): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. 3. Auflage, Springer Berlin Heidelberg
- Streng H. (1993): Untersuchungen zum Brandverhalten von Hobelspänen. Praktikantenbericht, Institut für Holzforschung, TU München
- Suleiman B.M., Larfeldt J., Leckner B., Gustavsson M. (1999): Thermal conductivity and diffusivity of wood. Wood Sci Technol 33, 465 - 473
- Svennerstedt B. (1986): Settling of loose fill thermal insulation. National Swedish Institute for Building Research, Bulletin M85:31, Gävle, Sweden
- Svennerstedt B. (1988): Laboratory method for determining settling - "Box Method". Swedish University of agricultural sciences. Department of Farm Buildings. Draft for ISO/TC163/SC1/WG7.
- Tröger J. (2001): Setzungsverhalten von Schütt-Dämmstoffen. Mikado 1/2001. S. 66 - 70
- Tzscheuschler P., Nickel M., Wernicke I., Buttermann H.G. (2009): Energieverbrauch in Deutschland. Stand 2007: Daten, Fakten, Kommentare. BWK Bd. 61, Nr. 6, S. 6 - 14 et al. 2009

- ULC (Underwriters Laboratories of Canada) (1979): Guide for small scale fire and smouldering tests for cellulose fibre loose fill insulation. Scarborough, Ontario
- UVT (2007): Mischen von festen Stoffen. Labor für Umweltverfahrenstechnik der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Versuchsbeschreibung
- Uusvaara O. (1974): Properties of sawdust utilised in industry. Bericht Institutum Forestale Fenniae, Helsinki.
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. (1997): Wärmedämmstoff aus losen, ungebundenen Holzpartikeln. Holz Roh- Werkst, 55, 286
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. (1998a): Zum Brandverhalten von Holzspänen und Holzfasernstoffen in ihrer Anwendung als Dämmstoffe. Holz- Zentralblatt Nr. 118, 1662
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. (1998b): Holzspäne als Wärmedämmstoff. mikado, 45 - 48.
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. (1998c): Thermal insulation based on loose wood chips. In: Proceedings of 10th European Conference and Technology Exhibition, Biomass for Energy and Industry, Würzburg, 173-175
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. (1999): Dämmstoffe aus Holz. mikado, 50 - 53
- Vogel K. (1999): Die Eignung von Holz als Wärmedämmstoff. Vergleichende Untersuchungen von Spänen und Fasern. Dissertation der Ludwig-Maximilians-Universität, München. Aachen: Shaker Verlag.
- Vogel K., Tröger F., Wegener G. (2002): Einbau von unbehandelten Holzspänen in einem Keck GmbH-Musterhaus und begleitende messtechnische Untersuchungen. Abschlussbericht DBU-Projekt
- Völkner S. (2003): Zum Einfluss räumlich begrenzter Diskontinuitäten auf die zeitabhängige Feuchteverteilung in Aussenwänden. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- Vorreiter L. (1943): Handbuch der Holzabfallwirtschaft. Neumann-Neudamm
- Wambach S., Schneider W. (1992): Außenrüttler, Grundlagen und praktische Anwendung der Rütteltechnik. Verlag Moderne Industrie
- Wegener G., Vogel K., Tröger F. (2004): Abschlussbericht BMBF-Verbundprojekt, Teilvorhaben Bauphysik und Materialcharakterisierung im Verbundvorhaben: Produktion loser Dämmstoffe aus Holzspänen und -fasern als höherwertige stoffliche Nutzung von Industrierestholz und Schwachholz
- Wegener G., Heisel U. (2007): Grundlagenuntersuchungen zur Bildung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz. Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe, Januar 2007
- Weichert L. (1963): Untersuchungen über das Sorptions- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Preßvollholz bei Temperaturen zwischen 20°C und 100°C. Holz Roh- Werkst, 21, 8, 290 - 300
- Weiß B., Plaschkies K., Scheiding W. (2006): Merkblatt „Schimmelpilzbefall in Kirchen und an sakralem Kunstgut aus Holz“. Institut für Holztechnologie gGmbH. Eigenverlag
- Weißbach G. (1985): Zur Volumenbeständigkeit von losen Schüttungen als Wärmedämmstoffe im Bauwesen. wksb-Sonderausgabe

Willems M., Dinter S., Schild K. (2006): Handbuch Bauphysik: Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

Wulkan E.K.H. (1983): Das Verhalten von Dämmstoffen in nachträglich verfülltem zweischaligen Mauerwerk mit Luftschicht. Bauphysik 4, 116 - 121

Normen:

DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Deutsches Institut für Normung e.V. 1998-05-00

DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau

DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. 2007-06-00

DIN 4150-1: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen. 2001-06-00

DIN 4150-2: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. 1999-06-00

DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlage. 1999-02-00

DIN 50014: Normalklimate für Vorbehandlung und/oder Prüfung - Festlegungen (ISO 554:1976) (Vorschlag für eine Europäische Norm). 1996-07-00

DIN 50050-1: Prüfung von Werkstoffen; Brennverhalten von Werkstoffen; Kleiner Brennkasten. 1986-04-00

DIN 52110: Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Schüttdichte von Gesteinskörnungen. 1985-08-00

DIN 52612-1: Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Durchführung und Auswertung. 1979-09-00

DIN 66126: Bestimmung der spezifischen Oberfläche disperser Feststoffe mit Durchströmungsverfahren; Grundlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. 1989-02-00

DIN 66160: Messen disperser Systeme, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V. September 1992

DIN 66165-1: Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Grundlagen. Deutsches Institut für Normung e.V. 1987-04-00

DIN 66165-2: Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Durchführung. Deutsches Institut für Normung e.V. 1987-04-00

DIN EN 322: Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes; Deutsche Fassung EN 322:1993

DIN EN 1191: Fenster und Türen - Dauerfunktionsprüfung - Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1191:2000. 2000-08-00

DIN EN 29053: Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991); Deutsche Fassung EN 29053:1993. 1993-05-00

DIN EN 60068-2-10: Umgebungseinflüsse - Teil 2-10: Prüfverfahren - Prüfung J und Leitfaden: Schimmelwachstum (IEC 60068-2-10:2005); Deutsche Fassung EN 60068-2-10:2005. 2006-03-00

DIN EN ISO 12571: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2000); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2000

DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (ISO 12572:2001). 2001-09-00

EN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahmeverfahren; Deutsche Fassung EN 932-1:1996

ISO/CD 18393: Thermal Insulation – Accelerated ageing of thermal insulation materials – Assessment of settlement of loose-fill thermal insulation used in attic and closed cavity applications. Draft International Standard, 10.04.2001

Internetquellen:

Anonymus (2007a): [http://www.bmelv.de/nn\\_1021300/DE/081-NachwachsendeRohstoffe/NaturdaemmstoffeSeminar.html\\_\\_nnn=true](http://www.bmelv.de/nn_1021300/DE/081-NachwachsendeRohstoffe/NaturdaemmstoffeSeminar.html__nnn=true) (15.02.2008)

Anonymus (2007b): [http://www.infoholz.de/html/f\\_page.phtml?p1=1203083434a403137786&p3=1726](http://www.infoholz.de/html/f_page.phtml?p1=1203083434a403137786&p3=1726) (15.02.2008)

Anonymus (2002): <http://www.waermedaemmstoffe.com/hm/eigenschaften.htm> (15.02.2008)

AGEB (2009): <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=139> (15.07.2009), Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 - 2008. Berechnungen auf Basis des Wirkungsgradansatzes. Stand: 28.10. 2009. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.

AGEB (2010a): <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=62> (15.07.2010), Primärenergieverbrauch, Jahr 2009, aktualisiert am 09.03.2010

AGEB (2010b): <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=66> (28.07.2010), Primärenergieverbrauch nach der Wirkungsgradmethode, aktualisiert am 28.02.2010

BMWI (2010):

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Presse/pressemitteilungen,did=324802.html?view=renderPrint> (08.07.2010), Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2009 deutlich gesunken. Pressemitteilung des BMWI vom 21.12.2009

DESTATIS (2009):

[http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2009/02/PD09\\_\\_055\\_\\_85,templateId=renderPrint.psm1](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2009/02/PD09__055__85,templateId=renderPrint.psm1) (08.07.2010), Rückläufiger Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen. Statistisches Bundesamt Deutschland, Pressemitteilung Nr. 055 vom 18.12.2009

Persönliche Auskünfte:

Eiber M. (2007): persönliche Auskunft Herr Michael Eiber (Fa. Baufritz, Erkheim), Erkheim, Oktober 2007

Fennig 2007: persönliche Auskunft Herr Karlheinz Fennig, MPA Nordrhein-Westfalen Dortmund, Oktober 2007

## 9 Anhang

Anhang 1 Wärmeleitfähigkeitswerte der Einzelmaterialien aus den Vorversuchen

FES 01					Hobelspan 02					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	20,4	30,3	40,0	50,0	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	55,8	70,2	90,4	110,3	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0534	0,0468	0,0435	0,0421	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0484	0,0454	0,0454	0,0458	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,042	W/(m*K) bei	50	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,046	W/(m*K) bei	83	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Fichte Bandsägespan 03					Lärche Hobel-/Bandsägespan 04					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	245,7	307,6	353,7	290,3	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	110,6	140,2	169,2	201,1	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0572	0,0592	0,0606	0,0568	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0467	0,0468	0,0493	0,0512	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,057	W/(m*K) bei	290	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,047	W/(m*K) bei	90	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Fichte Kreissägespan 05					Hobeldämmspangemisch 06					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	169,5	149,6	169,3	174,4	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	40,5	60,2	80,1	100,2	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0492	0,0480	0,0498	0,0514	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0446	0,0420	0,0421	0,0424	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,047	W/(m*K) bei	190	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,042	W/(m*K) bei	75	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Holzstoff 07					Faserstoff 08					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	44,9	74,5	94,0	109,6	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	45,1	50,0	65,2	85,8	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0413	0,0404	0,0402	0,0411	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0376	0,0383	0,0377	0,0387	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,043	W/(m*K) bei	56	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,038	W/(m*K) bei	55	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Altpapierflocken 09					Wiesengrasdämmstoff 10					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	40,1	60,6	80,1	33,0	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	35,1	55,2	69,6	75,1	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0385	0,0391	0,0408	0,0394	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0403	0,0383	0,0380	0,0379	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,039	W/(m*K) bei	50	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,036	W/(m*K) bei	75	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Miscanthusspäne 11					Hanfschäben 12					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	159,9	149,6	169,0	-	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	106,0	114,4	124,9	134,4	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0488	0,0492	0,0489	-	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0459	0,0465	0,0458	0,0466	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,040	W/(m*K) bei	180	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,050	W/(m*K) bei	106	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Hanffasern 13					Flachsschäben 14					
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	90,1	109,3	129,3	150,0	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	115,4	124,5	135,1	143,9	
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0449	0,0460	0,0472	0,0482	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0423	0,0428	0,0432	0,0430	
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,045	W/(m*K) bei	90	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,042	W/(m*K) bei	115	kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>	
Flachsfasern 15										
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	55,1			84,4			114,7			144,4
$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	0,0432			0,0443			0,0463			0,0465
$\lambda_{10^\circ\text{C},\text{MIN}}$	0,043			W/(m*K) bei			55			kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup>

Anhang 2 Mittlere Konzentration  $\bar{c}_K$ , Konzentration der Grundgesamtheit  $c_{Gg}$ , geschätzte empirische Streuung  $s_k^2$  der in den Vorversuchen untersuchten Mischungen

Variante	t [s]	$\bar{c}_K$	$c_{Gg}$	$\bar{c}_K - c_{Gg}$	$s_k^2$	$n_{Ges}$	gepr. Chargen
M02_1	15	28,1 %	24,3 %	3,8 %	0,39 %	5	1
	30	29,0 %	24,3 %	4,7 %	0,14 %	3	1
	60	29,2 %	24,3 %	4,8 %	0,05 %	6	1
	120	26,9 %	24,3 %	2,6 %	0,11 %	6	1
	180	26,4 %	24,3 %	2,1 %	0,25 %	6	1
M04_1	15	38,5 %	22,9 %	15,7 %	2,16 %	3	1
	30	19,5 %	22,9 %	-3,3 %	0,44 %	3	1
	60	26,8 %	22,9 %	3,9 %	0,93 %	3	1
	120	26,3 %	22,9 %	3,5 %	0,88 %	3	1
	180	31,2 %	22,9 %	8,3 %	0,67 %	3	1
M07_1	15	34,9 %	32,4 %	2,5 %	2,45 %	3	1
	30	39,1 %	32,4 %	6,6 %	0,72 %	3	1
	60	36,8 %	32,4 %	4,4 %	0,00 %	3	1
	120	36,2 %	32,4 %	3,8 %	0,00 %	3	1
	180	35,9 %	32,4 %	3,4 %	0,03 %	3	1
M08_1	15	45,8 %	32,4 %	13,4 %	6,37 %	3	1
	30	36,4 %	32,4 %	4,0 %	2,54 %	3	1
	60	36,0 %	32,4 %	3,5 %	0,30 %	3	1
	120	37,8 %	32,4 %	5,4 %	0,01 %	3	1
	180	37,3 %	32,4 %	4,9 %	0,05 %	3	1
M09_1	15	-	-	-	-	-	-
	30	34,9 %	34,5 %	0,4 %	0,29 %	3	1
	60	39,3 %	34,5 %	4,8 %	0,06 %	3	1
	120	38,2 %	34,5 %	3,7 %	0,05 %	3	1
	180	-	-	-	-	-	-
M12_1	15	21,2 %	20,1 %	1,1 %	1,67 %	3	1
	30	22,6 %	20,1 %	2,5 %	1,37 %	3	1
	60	21,9 %	20,1 %	1,7 %	0,15 %	3	1
	120	22,4 %	20,1 %	2,3 %	0,22 %	3	1
	180	20,4 %	20,1 %	0,2 %	0,00 %	3	1
M13_1	15	32,9 %	22,9 %	10,0 %	5,52 %	3	1
	30	32,8 %	22,9 %	10,0 %	1,85 %	3	1
	60	30,5 %	22,9 %	7,6 %	0,18 %	3	1
	120	29,0 %	22,9 %	6,1 %	0,02 %	3	1
	180	27,5 %	22,9 %	4,7 %	0,25 %	3	1
M14_1	15	28,9 %	18,8 %	10,1 %	4,25 %	3	1
	30	21,2 %	18,8 %	2,3 %	0,52 %	3	1
	60	18,9 %	18,8 %	0,0 %	0,18 %	3	1
	120	19,2 %	18,8 %	0,4 %	0,04 %	3	1
	180	21,9 %	18,8 %	3,1 %	0,34 %	3	1
M15_1	15	46,9 %	32,7 %	14,2 %	2,25 %	3	1
	30	39,6 %	32,7 %	7,0 %	0,24 %	3	1
	60	40,4 %	32,7 %	7,7 %	0,18 %	3	1
	120	38,2 %	32,7 %	5,5 %	0,00 %	3	1
	180	40,9 %	32,7 %	8,3 %	0,54 %	3	1

## Anhang 3 Siebungsparameter und die Massenanteile der Fraktionen (Mat.kennz. 01, H01, H02, H08, H08i, H09, H09i)

Material: Sützspan 01		w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s	$Q_{m,i}$
Siebmaschinentyp:	Fa. Retsch; KS 1000	10000	7,29 %	1,16 %	100,00 %
Einstellung [U/min]:	85	7100	11,94 %	1,60 %	92,71 %
Siebzeit [min]:	24	5000	24,67 %	1,13 %	80,77 %
mittl. Einwaage [g]:	15,92	2800	23,37 %	1,56 %	56,10 %
mittl. Siebverlust:	1,12 %	1250	19,19 %	1,55 %	32,73 %
Klimatisierung:	Raumklima	630	7,80 %	1,15 %	13,54 %
Einzelversuche:	5	0	5,73 %	0,57 %	5,73 %

Mat.kennz.:	H01			H02		
Klimatisierung:	20/65			20/65		
Siebmaschinentyp	Fa. Retsch, AS 200 control			Fa. Retsch, AS 200 control		
$V_F$ [ $\text{cm}^3/\text{dm}^2$ ] (DIN 66165):	115			82,5		
$V_f \cdot x \dots / \text{nutzb. Siebvol. [m}^3\text{]}$ :	2,5	0,000903		2,5	0,000648	
Siebzeit [min]:	30			22		
Siebbodenbeschl. [ $x \cdot 9,81 \text{m/s}^2$ ]:	8,0			8,0		
Einzelversuche:	7			7		
Materialfeuchte [%]:	11,9			12,3		
Zieleinwaage [g]:	14,75			41,24		
mittl. Ist-Einwaage [g]:	14,26			41,37		
mittl. Siebverlust [%]:	0,40			0,10		
	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s
	12500	3,41 %	0,73 %	7100	3,11 %	0,85 %
	11200	6,10 %	1,77 %	4500	12,69 %	2,96 %
	10000	14,14 %	2,02 %	3550	13,01 %	1,88 %
	9500	12,93 %	1,51 %	2800	11,34 %	1,09 %
	8000	12,59 %	1,98 %	2000	16,50 %	0,72 %
	4500	18,41 %	1,51 %	1250	20,77 %	1,85 %
	2500	15,54 %	0,52 %	500	16,73 %	3,50 %
	1000	11,92 %	3,28 %	0	5,85 %	1,85 %
	0	4,95 %	2,53 %			

Mat.kennz.:	H08			H08i		
Klimatisierung:	20/65			20/65		
Siebmaschinentyp	Fa. Retsch, AS 200 control			Fa. Retsch, AS 200 control		
$V_F$ [cm <sup>3</sup> /dm <sup>2</sup> ] (DIN 66165):	30			30		
$V_f \cdot x \dots$ / nutzbb. Siebvol. [m <sup>3</sup> ]:	2,0	0,000188		2,0	0,000188	
Siebzeit [min]:	16			16		
Siebbodenbeschl. [ $x \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$ ]:	8,0			8,0		
Einzelversuche:	7			7		
Materialfeuchte [%]:	12,0			12,0		
Zieleinwaage [g]:	5,34			5,34		
mittl. Ist-Einwaage [g]:	5,16			5,20		
mittl. Siebverlust [%]:	0,62			0,74		
	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s
	1400	6,57 %	2,35 %	1400	2,62 %	1,08 %
	710	13,05 %	1,30 %	710	7,95 %	0,48 %
	315	13,23 %	0,83 %	315	14,44 %	1,25 %
	125	13,39 %	0,26 %	125	16,83 %	1,01 %
	50	30,18 %	0,97 %	50	47,66 %	3,90 %
	0	23,58 %	2,60 %	0	10,51 %	2,78 %

Mat.kennz.:	H09			H09i		
Klimatisierung:	20/65			20/65		
Siebmaschinentyp	Fa. Retsch, AS 200 control			Fa. Retsch, AS 200 control		
$V_F$ [cm <sup>3</sup> /dm <sup>2</sup> ] (DIN 66165):	55			55		
$V_f \cdot x \dots$ / nutzbb. Siebvol. [m <sup>3</sup> ]:	0,7	0,000098		0,7	0,000098	
Siebzeit [min]:	28			28		
Siebbodenbeschl. [ $x \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$ ]:	8,0			8,0		
Einzelversuche:	7			7		
Materialfeuchte [%]:	8,5			8,5		
Zieleinwaage [g]:	4,01			4,01		
mittl. Ist-Einwaage [g]:	0,00			4,02		
mittl. Siebverlust [%]:	0,38			1,03		
	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s	w [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{x}$	s
	3550	17,83 %	2,23 %	3550	3,52 %	0,49 %
	2500	24,51 %	2,43 %	2500	23,54 %	1,17 %
	1700	18,91 %	0,47 %	1700	22,05 %	0,80 %
	1000	9,93 %	0,31 %	1000	14,95 %	3,27 %
	200	17,33 %	0,81 %	200	22,38 %	2,80 %
	0	11,51 %	0,77 %	0	13,57 %	1,07 %



Anhang 4 Wärmeleitfähigkeitswerte  $\lambda_{10^\circ\text{C}}$  bei unterschiedlicher Einbringdichte

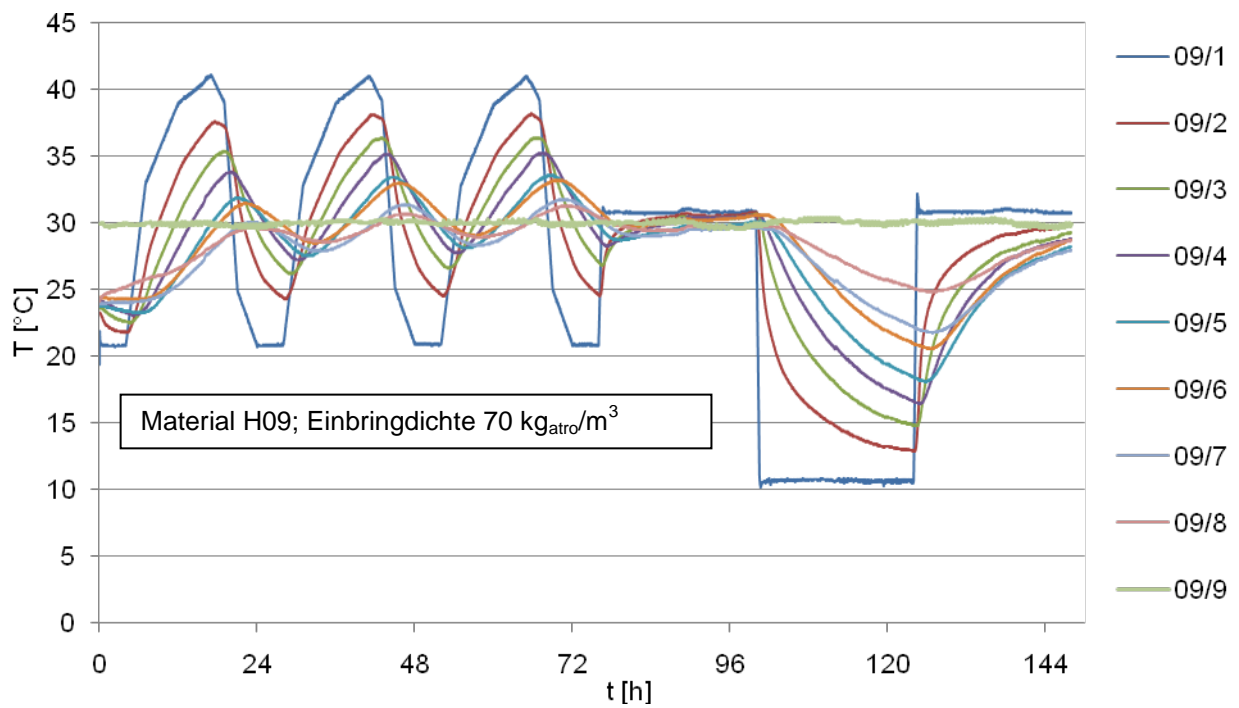
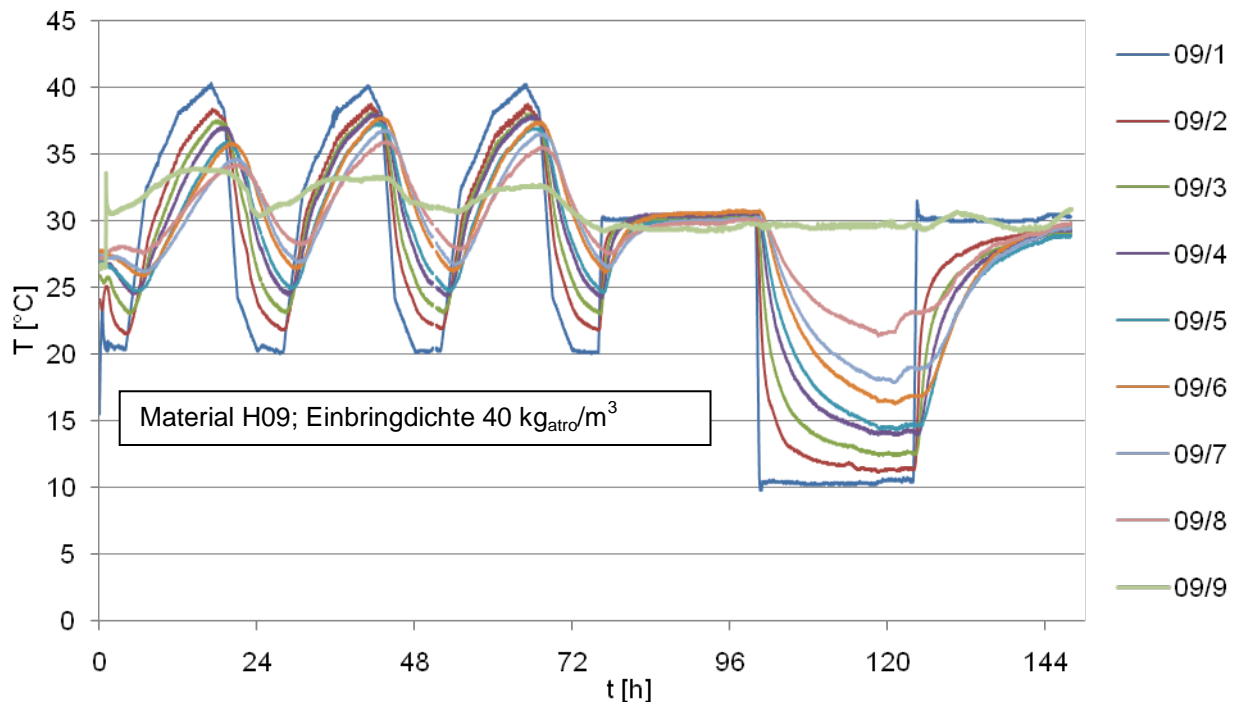
## Einzelmaterialien

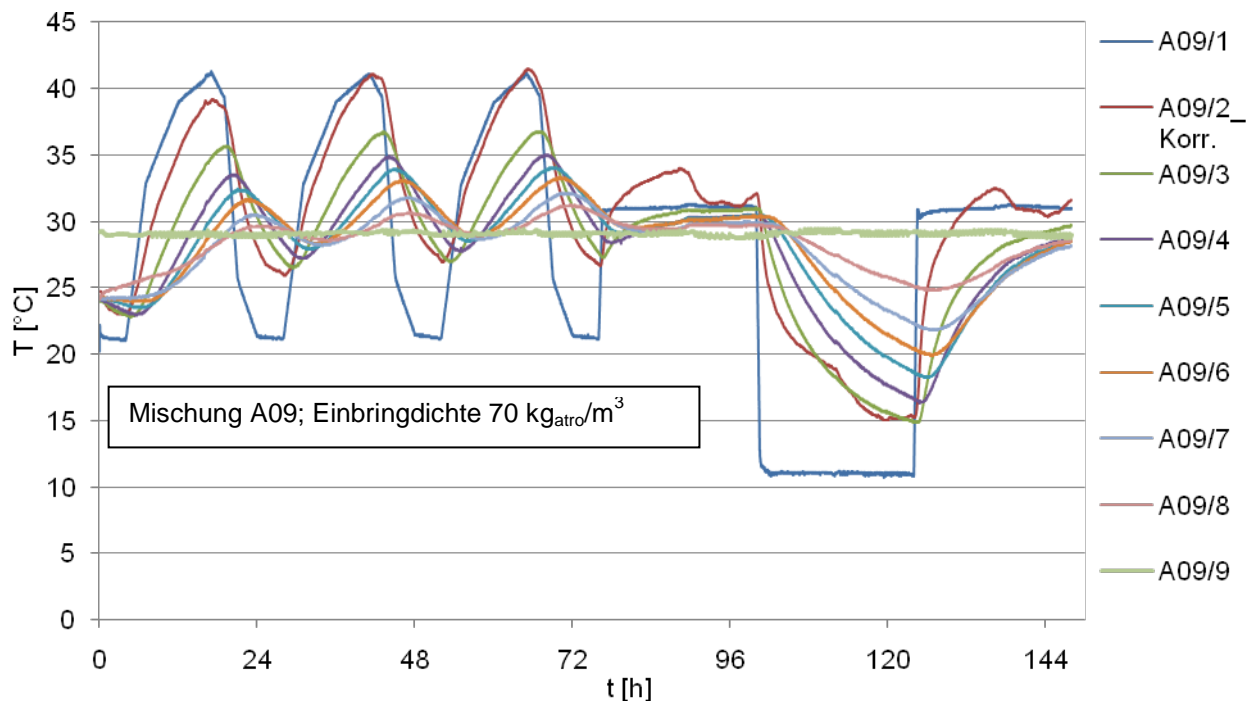
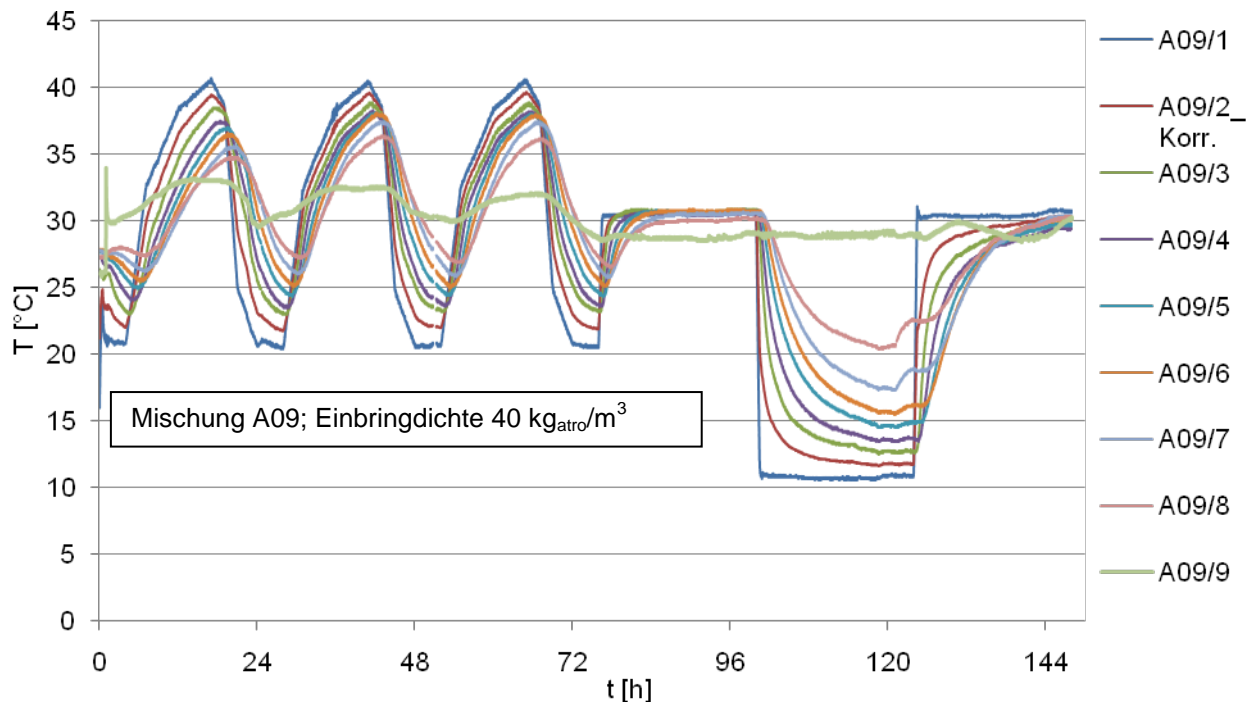
H01		H02		H08		H09	
$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]
18,5	0,056226	65,7	0,046598	24,7	0,038100	40,6	0,039600
20,2	0,054942	70,4	0,045981	30,3	0,038600	45,6	0,039400
25,5	0,051412	76,1	0,045924	35,3	0,036200	50,8	0,039400
30,8	0,049142	80,6	0,045529	40,2	0,037200	55,7	0,039500
35,2	0,046703	86,0	0,045505	45,3	0,036200	60,7	0,039200
40,5	0,045131	90,9	0,045378	50,3	0,037000	66,1	0,039600
45,3	0,044259	96,3	0,045985	55,5	0,035900	71,1	0,040300
50,7	0,042984			60,6	0,037000	76,5	0,040300
55,5	0,042968			65,5	0,036300	81,0	0,040600
60,1	0,042757			70,6	0,037300		
65,3	0,041901						
70,8	0,042198						
75,2	0,041837						
81,4	0,041712						
85,9	0,041646						
91,2	0,040628						

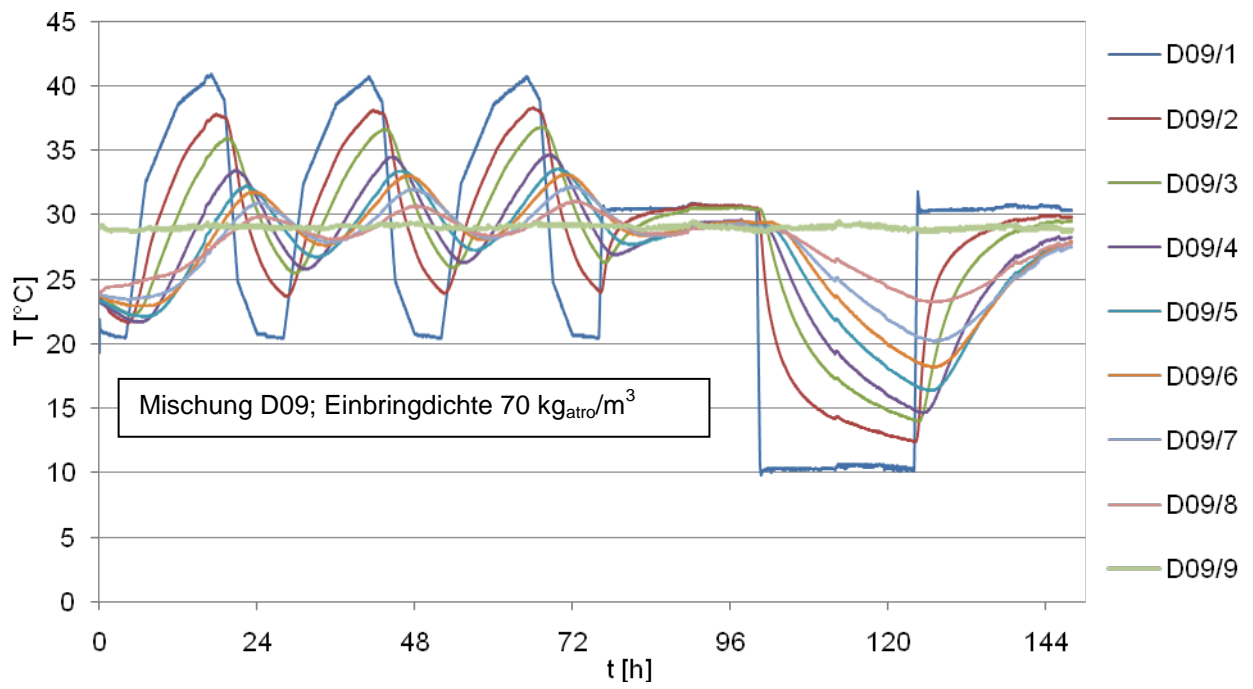
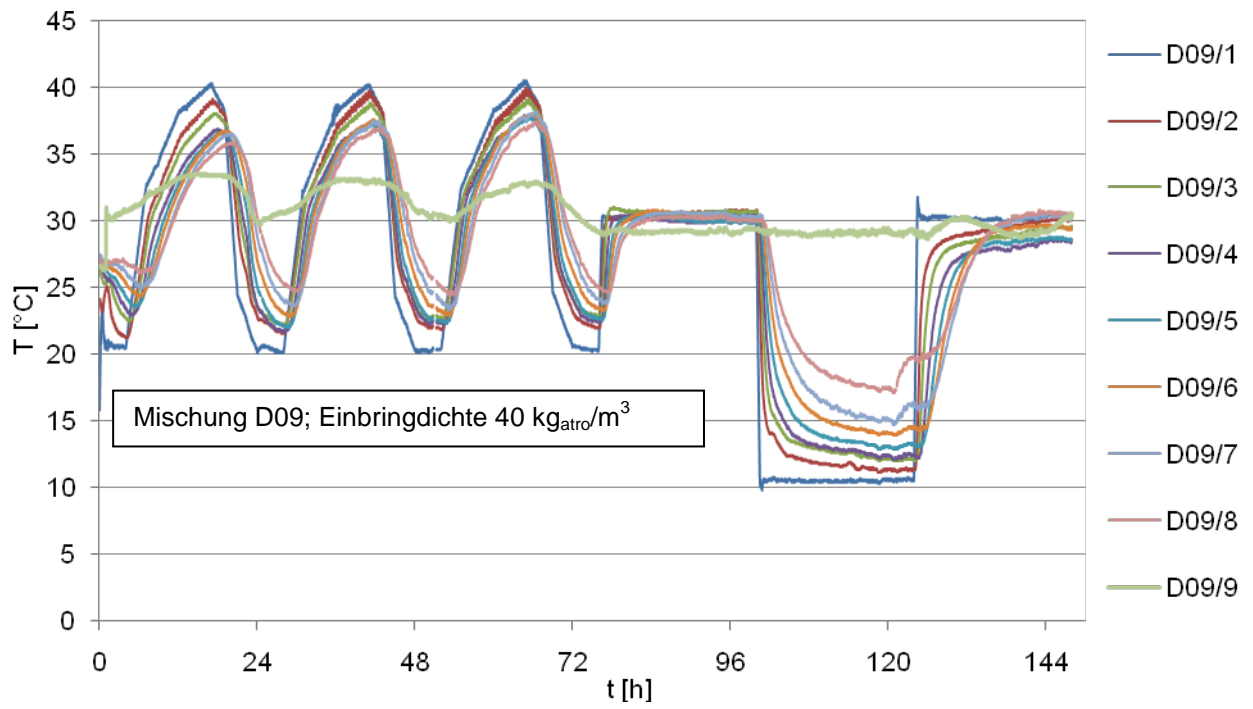
## 2- und 3-komponentige Mischungen

A02		B02		C02		D02	
$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]
65,2	0,0446	65,3	0,0438	40,2	0,0501	30,4	0,0505
75,4	0,0442	75,4	0,0431	60,6	0,0443	40,3	0,0464
95,6	0,0433	90,4	0,0424	80,4	0,0432	60,1	0,0436
120,8	0,0436	101,1	0,0422	100,9	0,0428	80,3	0,0416
A08		B08		C08		D08	
$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]
24,9	0,0401	25,0	0,0429	25,4	0,0422	20,3	0,0513
29,8	0,0381	45,2	0,0382	35,3	0,0392	30,1	0,0449
35,4	0,0375	50,3	0,0370	40,6	0,0384	35,3	0,0423
39,8	0,0366	60,2	0,0364	50,4	0,0375	40,3	0,0424
45,3	0,0366	70,5	0,0360	55,8	0,0372	50,3	0,0402
50,3	0,0367			60,2	0,0380	55,7	0,0404
55,5	0,0363			65,3	0,0380	65,4	0,0387
61,0	0,0366			71,0	0,0371	69,8	0,0384
65,6	0,0366			74,0	0,0371	81,0	0,0388
70,8	0,0359						
81,1	0,0361						
A09		B09		C09		D09	
$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]
30,3	0,0434	31,1	0,0432	30,3	0,0438	20,5	0,0517
33,1	0,0411	41,1	0,0407	37,7	0,0416	27,1	0,0467
37,5	0,0408	50,7	0,0399	42,6	0,0413	31,0	0,0449
42,8	0,0400	55,7	0,0402	47,1	0,0405	37,4	0,0436
47,2	0,0399	60,8	0,0403	52,7	0,0406	41,8	0,0428
52,8	0,0395	66,1	0,0402	56,4	0,0405	46,6	0,0420
58,0	0,0396	71,1	0,0403	61,1	0,0405	50,2	0,0413
63,1	0,0400	81,0	0,0410	65,9	0,0402	56,2	0,0409
65,7	0,0396			70,8	0,0402	60,3	0,0405
75,4	0,0404			75,3	0,0408	65,5	0,0405
				79,7	0,0409	70,2	0,0405
						75,7	0,0407
						84,5	0,0408
E08		E09		F08			
$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg <sub>atmo</sub> /m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{10^\circ\text{C}}$ [W/(m*K)]		
35,3	0,0479	34,8	0,0479	30,3	0,0449		
44,7	0,0443	45,4	0,0446	35,9	0,0428		
55,9	0,0428	55,1	0,0436	40,0	0,0418		
65,1	0,0418	64,9	0,0421	50,3	0,0405		
75,1	0,0419	74,8	0,0416	60,1	0,0395		
85,1	0,0416	85,1	0,0415	70,5	0,0398		
99,8	0,0418	100,6	0,0416	80,3	0,0397		
				100,3	0,0394		

## Anhang 5 Temperaturamplitudenverhältnis







## Anhang 6 Strömungswiderstand und Einbringdichte

H01	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]		H09	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
	40,5	0,15	686	283		38,6	0,11	5877	804
	46,3	0,17	1136	206		44,1	0,13	9291	2136
	54,0	0,20	2200	237		51,5	0,15	17426	1448
	57,9	0,22	2990	425		61,8	0,18	34113	1660
	62,3	0,27	4056	288	77,2	0,23	77325	3937	
H08	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]		A09	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
	25,0	0,14	2077	352		32,6	0,12	1001	206
	28,6	0,16	2829	378		37,3	0,14	1136	261
	33,3	0,19	4310	305		43,5	0,17	2565	469
	40,0	0,23	6459	861		52,2	0,20	5059	1764
	50,0	0,28	10026	820		65,2	0,25	19495	2701
	66,6	0,38	18648	1202		87,0	0,33	76151	5517
	71,4	0,41	21816	2330					
A08	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]		C09	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
	23,5	0,13	833	265		26,4	0,03	427	77
	26,8	0,15	1081	467		30,1	0,04	656	215
	31,3	0,18	1276	960		35,2	0,04	1268	364
	37,6	0,21	3181	413		42,2	0,05	2533	811
	47,0	0,27	5634	1008		52,8	0,07	5333	1995
	62,6	0,36	13420	324		70,3	0,09	18227	2937
	78,3	0,45	25056	1320	92,7	4,31	79935	15663	
C08	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]		D09	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
	22,6	0,72	734	117		19,4	0,38	147	7
	25,9	0,83	888	510		22,2	0,44	190	27
	30,2	0,96	1516	311		25,9	0,51	334	71
	36,2	1,16	2317	312		31,0	0,61	485	85
	45,3	1,45	4458	967		38,8	0,76	758	298
	60,4	1,93	10682	813		51,7	1,02	2638	1271
	75,5	2,41	22854	3301	70,5	1,39	6126	1689	
D08	$\rho$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		$r$ [Pa*s/m <sup>2</sup> ]						
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s					
	30,9	0,10	592	189					
	38,7	0,13	1561	526					
	51,6	0,17	3046	1343					
	64,4	0,21	5851	829					

Anhang 7 Ergebnisse der Prüfung zur Volumenstabilität mit dem Kleinprüfstand der in den Hauptversuchen verwendeten Materialien H01, H02, H08 und H09

H01 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 100 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	8,7	0,14	1,61 %	1	25,3	100,0 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	16,1	0,74	4,60 %	2	26,6	100,0 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	21,7	1,12	5,14 %	3	23,8	100,0 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	25,3	1,22	4,84 %	4	26,5	100,0 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	19,6	1,20	6,15 %	5	24,4	100,0 %
H02 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 0 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	10,1	0,08	0,77 %	1	73,0	0,0 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	63,0	0,06	0,10 %	2	85,6	0,0 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	67,7	1,55	2,28 %	3	83,6	0,0 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	82,4	5,47	6,64 %	4	83,0	0,0 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	72,6	5,13	7,07 %	5	86,8	0,0 %
H08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 0 %
				Versuch	$[\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	$c_K$
u [%]	8,2	0,29	3,57 %	1	41,0	0,0 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	25,4	0,12	0,46 %	2	41,9	0,0 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	33,3	0,24	0,72 %	3	41,1	0,0 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	41,3	0,39	0,95 %	4	41,2	0,0 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	35,3	0,46	1,30 %	5	41,0	0,0 %
H09 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 0 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	6,9	0,12	1,79 %	1	72,6	0,0 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	41,0	0,06	0,14 %	2	73,1	0,0 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	63,0	0,86	1,37 %	3	76,2	0,0 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	73,7	1,69	2,29 %	4	72,0	0,0 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	64,4	2,14	3,32 %	5	74,5	0,0 %

Anhang 8 Setzungsverhalten der 2-komponentigen Mischungen auf dem Kleinprüfstand im unregulierten Raumklima; jeweils 5 Einzelversuche

A02 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 9,2 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	6,8	0,19	2,75 %	1	73,1	17,3 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	54,0	3,74	6,92 %	2	76,1	7,9 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	63,2	3,62	5,72 %	3	70,4	15,9 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	73,6	3,58	4,86 %	4	70,2	22,0 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	65,0	4,02	6,17 %	5	78,4	14,1 %
B02 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 16,1 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	5,7	0,29	5,14 %	1	53,5	-
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	40,8	5,30	12,96 %	2	53,0	-
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	49,7	5,37	10,81 %	3	60,5	-
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	59,0	6,51	11,05 %	4	69,1	-
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	50,8	6,32	12,44 %	5	58,7	-
C02 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 24,8 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	6,5	0,19	2,95 %	1	54,4	45,2 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	42,6	4,61	10,82 %	2	65,0	23,6 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	51,1	4,93	9,65 %	3	57,4	23,4 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	59,7	5,61	9,40 %	4	55,2	48,0 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	51,3	5,09	9,93 %	5	66,4	24,3 %
D02 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 56,3 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	5,5	0,16	2,98 %	1	32,3	98,1 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	22,0	1,79	8,11 %	2	35,1	78,4 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	28,5	2,11	7,41 %	3	33,1	-
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	32,1	2,23	6,96 %	4	30,1	77,9 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	26,2	2,16	8,25 %	5	29,8	-
A08 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 13,6%
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	5,3	0,12	2,29 %	1	37,7	18,3 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	22,2	0,40	1,80 %	2	37,9	22,8 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	32,4	0,26	0,82 %	3	38,5	14,3 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	37,9	0,39	1,03 %	4	38,0	12,0 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	32,5	0,62	1,89 %	5	37,5	19,5 %



B08 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 23,1 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	5,5	0,29	5,32 %	1	37,1	32,4 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	20,2	0,46	2,27 %	2	38,6	33,6 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	30,9	0,26	0,85 %	3	37,1	30,3 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	37,9	1,03	2,72 %	4	37,4	24,3 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,4	0,80	2,54 %	5	39,4	32,4 %
C08 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 33,9 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	5,4	0,18	3,32 %	1	37,5	36,8 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	21,9	0,27	1,25 %	2	37,6	39,3 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	32,5	0,52	1,59 %	3	37,5	42,3 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	37,6	0,20	0,54 %	4	37,4	43,4 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	30,8	0,39	1,28 %	5	37,9	41,6 %
D08 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 74,6 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	5,3	0,30	5,69 %	1	31,0	76,9 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	18,2	0,48	2,62 %	2	30,5	81,3 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	25,8	0,62	2,41 %	3	29,2	79,6 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	29,5	1,21	4,09 %	4	28,8	74,3 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	23,1	0,88	3,83 %	5	28,2	82,5 %
A09 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 13,3 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	4,6	0,10	2,09 %	1	62,6	9,1 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,4	0,33	1,05 %	2	64,1	10,1 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	53,2	0,71	1,34 %	3	62,5	9,5 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	63,3	0,99	1,57 %	4	62,6	10,1 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	49,1	1,03	2,09 %	5	64,6	15,9 %
B09 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 22,7 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	4,7	0,16	3,51 %	1	55,5	20,5 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	25,8	0,48	1,85 %	2	53,5	28,4 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	39,9	0,40	1,01 %	3	54,3	21,0 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	48,4	0,77	1,59 %	4	53,7	25,4 %
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	36,9	1,09	2,96 %	5	55,9	22,5 %

C09 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 33,5 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	4,6	0,32	6,86 %	1	48,2	36,7 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	26,6	0,40	1,51 %	2	49,4	30,6 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	44,9	0,52	1,16 %	3	48,3	35,6 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	54,6	1,10	2,02 %	4	48,8	37,3 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	42,9	1,12	2,61 %	5	47,3	31,8 %
D09 (Raumklima)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	MV = 65,9 %
				Versuch		c <sub>K</sub>
u [%]	5,3	0,30	5,69 %	1	31,0	71,9 %
$\rho_{\text{Start}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	18,2	0,48	2,62 %	2	30,5	68,6 %
$\rho_{\text{bel}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	25,8	0,62	2,41 %	3	29,2	74,2 %
$\rho_{\text{Setz}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	29,5	1,21	4,09 %	4	28,8	71,6 %
$\rho_{\text{Rück}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	23,1	0,88	3,83 %	5	28,2	62,8 %

## Anhang 9 Setzungsverhalten ausgewählter 2- und 3-komponentiger Mischungen auf dem Kleinprüfstand in 23/50; jeweils 3 Einzelversuche

A08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 13,6 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	9,0	0,07	0,81 %	1	41,9	18,0 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	22,5	0,12	0,54 %	2	42,4	15,2 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	34,0	0,13	0,39 %	3	42,2	15,5 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	42,2	0,27	0,64 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	35,4	0,02	0,06 %	-	-	-
C08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 33,9 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	8,6	0,15	1,70 %	1	39,1	40,4 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	20,9	0,41	1,98 %	2	38,5	43,3 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,6	0,38	1,20 %	3	39,2	40,6 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	38,9	0,35	0,90 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,7	0,56	1,75 %	-	-	-
D08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 74,6 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	7,9	0,12	1,49 %	1	31,5	74,9 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	18,4	0,29	1,55 %	2	32,2	86,9 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	27,0	0,56	2,09 %	3	32,0	91,1 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,9	0,36	1,11 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	24,9	0,34	1,36 %	-	-	-
A09 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 13,3 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	6,6	0,07	1,03 %	1	63,6	15,8 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	31,1	0,38	1,24 %	2	62,9	14,0 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	50,8	0,43	0,85 %	3	64,1	9,9 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	63,5	0,61	0,95 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	52,5	0,65	1,24 %	-	-	-
C09 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 33,5 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	7,3	0,27	3,67 %	1	49,9	33,4 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	24,6	0,49	1,98 %	2	50,3	34,9 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	40,3	1,30	3,21 %	3	49,6	35,7 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	49,9	0,35	0,70 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	39,7	0,50	1,27 %	-	-	-

D09 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 65,9 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	8,0	0,13	1,61 %	1	34,5	71,1 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	18,8	0,27	1,43 %	2	33,8	61,4 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	28,8	0,45	1,55 %	3	34,4	74,7 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	34,2	0,36	1,05 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	26,5	0,25	0,95 %	-	-	-
E08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 19,0 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	9,6	0,11	1,13 %	1	64,0	31,2 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	40,7	0,19	0,47 %	2	65,1	25,7 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	52,4	0,13	0,25 %	3	63,9	21,5 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	64,4	0,65	1,02 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	54,2	0,43	0,80 %	-	-	-
F08 (23/50)	Statistik			Einzelversuche		
	$\bar{x}$	s	V		$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	MV = 15,4 %
				Versuch		$c_K$
u [%]	9,4	0,27	2,87 %	1	58,9	16,4 %
$\rho_{\text{Start}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	35,9	0,13	0,38 %	2	58,5	19,7 %
$\rho_{\text{bel}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	47,7	0,21	0,44 %	3	58,9	18,1 %
$\rho_{\text{Setz}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	58,8	0,24	0,40 %	-	-	-
$\rho_{\text{Rück}} [\text{kg}_{\text{atro}}/\text{m}^3]$	50,3	0,16	0,33 %	-	-	-

Anhang

Anhang 10 Setzungsdichten der 2-komponentigen Mischungen A08, B08, C08 und D08 bei der Prüfung der Volumenstabilität auf dem kleinen Gefach (Bauteilversuche)

Versuchsnr.:	A08-23-01/04/05/06			A08-39-02	A08-47-03	B08-21-01	B08-37-02	B08-45-03	C08-22-01/04/05/06			C08-35-02	C08-42-03	D08-19-01/04/05/06			D08-28-02	D08-33-03
mittl. Feuchte:	9,6 %			8,5 %	7,8 %	8,4 %	8,2 %	8,0 %	8,8 %			7,5 %	8,1 %	8,1 %			7,8 %	7,5 %
$\rho_{\text{Start SOLL}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	23			39	47	21	37	45	22			35	42	19			28	33
n	4			1	1	1	1	1	4			1	1	4			1	1
	$\bar{x}$	s	V						$\bar{x}$	s	V			$\bar{x}$	s	V		
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{Start IST}}$	24,0	0,19	0,8 %	39,0	46,8	23,8	36,9	44,8	22,8	0,63	2,8 %	35,0	45,4	19,3	0,3	1,4 %	28,0	32,9
Konst. Vibration	32,1	0,29	0,9 %	39,8	46,8	29,8	37,9	44,8	29,1	0,12	0,4 %	36,0	45,4	22,8	0,1	0,3 %	28,2	33,0
1. Vibr. Hochlauf	32,9	0,35	1,1 %	39,9	46,8	30,5	38,1	44,8	29,8	0,06	0,2 %	36,0	45,4	23,1	0,1	0,4 %	28,2	33,0
1. Fallversuch	33,4	0,29	0,9 %	40,4	47,2	31,0	38,7	45,1	30,5	0,15	0,5 %	36,5	45,8	23,7	0,1	0,2 %	28,6	33,3
2. Fallversuch	33,9	0,29	0,8 %	41,0	47,5	31,4	39,3	45,5	30,8	0,27	0,9 %	37,1	46,3	24,1	0,1	0,3 %	28,9	33,6
3. Fallversuch	34,3	0,35	1,0 %	41,4	47,9	31,7	39,7	45,8	31,2	0,18	0,6 %	37,4	46,5	24,3	0,0	0,2 %	29,2	33,8
4. Fallversuch	34,6	0,28	0,8 %	42,0	48,2	32,0	40,1	46,2	31,5	0,17	0,5 %	37,8	46,9	24,6	0,0	0,2 %	29,4	33,9
5. Fallversuch	34,9	0,29	0,8 %	42,4	48,6	32,3	40,5	46,5	31,5	0,28	0,9 %	38,2	47,1	24,8	0,1	0,3 %	29,6	34,1
6. Fallversuch	35,1	0,30	0,8 %	42,7	48,7	32,5	39,4	46,7	31,9	0,15	0,5 %	38,3	47,3	24,9	0,0	0,2 %	29,8	34,2
7. Fallversuch	35,4	0,30	0,9 %	42,9	48,9	32,7	41,0	46,9	31,3	1,61	5,1 %	38,6	47,6	25,1	0,0	0,1 %	29,9	34,2
8. Fallversuch	35,5	0,27	0,8 %	43,2	49,1	32,9	41,2	47,1	32,2	0,17	0,5 %	38,7	47,7	25,2	0,1	0,2 %	30,0	34,3
9. Fallversuch	35,7	0,29	0,8 %	43,5	49,3	33,1	41,5	47,2	32,3	0,20	0,6 %	39,0	47,8	25,3	0,1	0,2 %	30,0	34,4
10. Fallversuch	35,8	0,28	0,8 %	43,7	49,5	33,2	41,7	47,3	32,4	0,12	0,4 %	39,2	47,9	25,4	0,0	0,1 %	30,2	34,4
2. Vibr. Hochlauf	35,8	0,25	0,7 %	43,3	48,9	33,3	41,1	46,7	32,3	0,24	0,8 %	38,7	47,4	25,4	0,1	0,3 %	30,0	34,0
Dichtegefälle:	$\bar{x}$	s	V						$\bar{x}$	s	V			$\bar{x}$	s	V		
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]
Oberes Drittel	31,8	0,89	2,8 %	41,3	46,9	32,2	38,0	42,1	28,8	0,39	1,4 %	35,3	-	22,8	0,5	2,0 %	26,9	31,1
Mittleres Drittel	35,5	1,48	4,2 %	41,9	46,8	31,9	40,6	47,7	31,6	1,08	3,4 %	38,4	-	25,1	0,9	3,7 %	30,9	31,8
Unteres Drittel	40,1	0,96	2,4 %	46,5	52,7	35,6	44,6	50,3	36,4	0,96	2,6 %	42,5	-	28,2	0,5	1,8 %	33,8	39,1



Setzungsdichten der 2-komponentigen Mischungen A09, B09, C09 und D09 bei der Prüfung der Volumenstabilität auf dem kleinen Gefach (Bauteilversuche)

Versuchsnr.:	A09-32-01/04/05/06			A09-52-02	A09-52-02(neu)	A09-63-03	B09-27-01	B09-46-02	B09-56-03	C09-26-01/04/05/06			C09-41-02	C09-49-03	D09-19-01/04/05/06			D09-30-02	D09-35-03
mittl. Feuchte:	6,2%			6,5%	6,3%	6,3%	6,5%	6,6%	6,3%	8,2%			6,6%	6,4%	8,6%			6,9%	7,4%
$\rho_{\text{Start SOLL}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	32			52	52	63	27	46	56	26			41	49	19			30	35
n	4			1	1	1	1	1	1	4					4				
	$\bar{x}$	s	V							$\bar{x}$	s	V			$\bar{x}$	s	V		
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{Start IST}}$	33,6	0,38	1,1 %	52,9	52,1	62,9	31,0	46,0	55,9	27,3	1,97	7,2 %	40,7	48,9	19,5	0,5	2,6 %	29,6	35,0
Konst. Vibration	43,8	0,50	1,1 %	53,1	52,7	63,0	38,7	46,4	55,9	34,2	0,23	0,7 %	41,4	49,0	24,1	0,3	1,1 %	29,7	35,0
1. Vibr. Hochlauf	44,5	0,48	1,1 %	53,3	53,5	63,0	39,2	46,6	56,0	34,7	0,23	0,6 %	41,5	49,0	24,4	0,3	1,0 %	29,7	35,0
1. Fallversuch	45,2	0,54	1,2 %	53,7	54,1	63,3	39,8	47,1	56,3	35,3	0,21	0,6 %	41,9	49,3	25,0	0,3	1,1 %	30,1	35,2
2. Fallversuch	45,8	0,46	1,0 %	54,4	54,6	63,9	40,3	47,9	56,7	35,8	0,25	0,7 %	42,4	49,7	25,5	0,2	0,7 %	30,4	35,5
3. Fallversuch	46,4	0,42	0,9 %	55,1	55,3	64,4	40,8	48,6	57,1	36,3	0,24	0,7 %	42,8	50,2	25,9	0,2	0,8 %	30,8	35,8
4. Fallversuch	46,9	0,55	1,2 %	55,5	56,0	65,0	41,2	49,4	57,5	36,6	0,25	0,7 %	43,3	50,6	26,2	0,2	0,6 %	31,1	36,0
5. Fallversuch	49,3	4,26	8,6 %	56,4	56,7	65,6	41,6	50,1	57,9	37,0	0,29	0,8 %	43,9	51,0	26,5	0,2	0,9 %	31,4	36,3
6. Fallversuch	47,8	0,53	1,1 %	56,8	57,2	66,0	41,9	50,6	58,2	37,3	0,31	0,8 %	44,2	51,3	26,7	0,1	0,5 %	31,5	36,4
7. Fallversuch	48,1	0,57	1,2 %	57,3	57,6	66,4	42,3	51,1	58,5	37,6	0,35	0,9 %	44,5	51,6	26,9	0,2	0,8 %	31,7	36,7
8. Fallversuch	48,5	0,53	1,1 %	58,0	58,2	66,8	42,5	51,6	58,7	37,8	0,35	0,9 %	44,8	51,9	27,1	0,2	0,7 %	31,9	36,8
9. Fallversuch	48,8	0,51	1,1 %	58,3	58,7	67,3	42,8	52,1	59,1	38,1	0,40	1,0 %	45,2	52,0	27,3	0,2	0,6 %	32,0	37,0
10. Fallversuch	49,1	0,39	0,8 %	58,7	59,2	67,9	43,0	52,7	59,4	38,2	0,41	1,1 %	45,4	52,2	27,5	0,2	0,7 %	32,1	37,2
2. Vibr. Hochlauf	49,0	0,35	0,7 %	59,2	59,2	67,9	42,9	52,5	59,3	38,0	0,29	0,8 %	45,3	52,2	27,3	0,2	0,7 %	31,9	36,9
Dichtegefälle:	$\bar{x}$	s	V							$\bar{x}$	s	V			$\bar{x}$	s	V		
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]
Oberes Drittel	40,2	2,40	6,0 %	54,2	51,4	63,0	36,2	46,3	56,3	32,3	1,84	5,7 %	41,0	49,6	25,0	0,7	3,0 %	30,9	34,7
Mittleres Drittel	50,1	1,42	2,8 %	57,5	61,1	67,9	41,6	53,5	57,4	38,6	0,44	1,1 %	45,1	52,9	26,6	0,9	3,3 %	30,1	36,5
Unteres Drittel	56,7	1,95	3,4 %	65,9	65,0	72,8	51,0	57,8	64,3	43,3	2,83	6,6 %	49,8	54,0	30,0	0,3	0,9 %	34,8	39,3





Setzungsdichten der 3-komponentigen Mischungen E08 und F08 bei der Prüfung der Volumenstabilität auf dem kleinen Gefach (Bauteilversuche)

Versuchsnr.:	E08-34-01/02/03/04			F08-30-01/02/03/04		
mittl. Feuchte:	9,8%			10,6%		
$\rho_{\text{Start SOL}}^{\text{SOLL}}$ [kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	34			30		
n	4			4		
	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	
$\rho_{\text{Start IST}}$	37,8	0,81	2,2 %	35,1	0,35	1,0 %
Konst. Vibration	45,0	0,65	1,4 %	42,5	0,26	0,6 %
1. Vibr. Hochlauf	45,8	0,69	1,5 %	43,4	0,31	0,7 %
1. Fallversuch	46,9	0,68	1,4 %	44,4	0,26	0,6 %
2. Fallversuch	47,6	0,65	1,4 %	45,0	0,25	0,5 %
3. Fallversuch	48,2	0,74	1,5 %	45,5	0,33	0,7 %
4. Fallversuch	48,6	0,77	1,6 %	45,9	0,32	0,7 %
5. Fallversuch	49,0	0,78	1,6 %	46,2	0,37	0,8 %
6. Fallversuch	49,3	0,77	1,6 %	46,5	0,31	0,7 %
7. Fallversuch	49,6	0,73	1,5 %	46,8	0,39	0,8 %
8. Fallversuch	49,8	0,72	1,4 %	47,0	0,36	0,8 %
9. Fallversuch	50,1	0,71	1,4 %	47,2	0,40	0,9 %
10. Fallversuch	50,3	0,83	1,6 %	47,4	0,38	0,8 %
2. Vibr. Hochlauf	50,4	0,87	1,7 %	47,4	0,46	1,0 %
Dichtegefälle:	$\bar{x}$	s	V	$\bar{x}$	s	V
	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]		[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	[kg <sub>atro</sub> /m <sup>3</sup> ]	
Oberes Drittel	45,9	0,66	1,4 %	42,9	0,59	1,4 %
Mittleres Drittel	49,5	1,06	2,1 %	46,4	0,72	1,6 %
Unteres Drittel	55,8	1,04	1,9 %	52,9	0,69	1,3 %

Anhang 11 Kumulierte prozentuale Erhöhung der Dichte während der einzelnen Versuchsschritte zur Bestimmung der volumenstabilen Dichte mit dem kleinen Gefach

	A08-23-01/04/05/06	A08-39-02	A08-47-03	A09-32-01/04/05/06	A09-52-02(neu)	A09-63-03
Konst. Vibration	68,9 %	19,4 %	1,2 %	66,1 %	9,0 %	1,6 %
1. Vibr. Hochlauf	75,0 %	22,3 %	0,6 %	70,8 %	20,3 %	2,3 %
1. Fallversuch	79,9 %	33,8 %	17,6 %	75,4 %	28,1 %	7,1 %
2. Fallversuch	83,6 %	47,7 %	35,2 %	79,3 %	35,1 %	20,0 %
3. Fallversuch	87,0 %	56,9 %	54,5 %	83,0 %	45,9 %	30,1 %
4. Fallversuch	89,7 %	70,4 %	68,6 %	86,2 %	54,5 %	41,0 %
5. Fallversuch	92,0 %	79,7 %	86,5 %	102,0 %	64,6 %	54,1 %
6. Fallversuch	94,1 %	87,7 %	91,3 %	92,0 %	72,5 %	62,0 %
7. Fallversuch	96,1 %	92,5 %	103,6 %	94,0 %	77,8 %	69,9 %
8. Fallversuch	97,3 %	98,5 %	111,8 %	96,7 %	86,6 %	78,4 %
9. Fallversuch	98,8 %	105,7 %	120,4 %	99,0 %	93,3 %	88,3 %
10. Fallversuch	99,9 %	109,3 %	130,3 %	100,6 %	99,9 %	100,3 %
2. Vibr. Hochlauf	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	B08-21-01	B08-37-02	B08-45-03	B09-27-01	B09-46-02	B09-56-03
Konst. Vibration	62,7 %	22,5 %	-1,0 %	64,7 %	5,6 %	0,3 %
1. Vibr. Hochlauf	70,6 %	27,4 %	0,7 %	69,0 %	9,2 %	0,6 %
1. Fallversuch	75,8 %	42,0 %	16,7 %	73,6 %	17,0 %	11,0 %
2. Fallversuch	80,0 %	56,2 %	36,3 %	77,7 %	28,8 %	21,4 %
3. Fallversuch	83,1 %	67,6 %	51,8 %	82,1 %	39,2 %	34,9 %
4. Fallversuch	86,5 %	77,0 %	72,3 %	85,2 %	51,7 %	47,4 %
5. Fallversuch	88,9 %	85,2 %	88,3 %	88,5 %	62,2 %	58,7 %
6. Fallversuch	91,1 %	89,9 %	101,6 %	91,6 %	70,2 %	65,8 %
7. Fallversuch	93,2 %	97,6 %	112,5 %	94,6 %	78,7 %	74,8 %
8. Fallversuch	95,3 %	103,1 %	120,4 %	96,6 %	86,4 %	82,3 %
9. Fallversuch	97,4 %	108,7 %	126,9 %	98,6 %	94,0 %	93,3 %
10. Fallversuch	99,3 %	113,2 %	133,3 %	100,5 %	102,1 %	101,6 %
2. Vibr. Hochlauf	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	C08-22-01/04/05/06	C08-35-02	C08-42-03	C09-26-01/04/05/06	C09-41-02	C09-49-03
Konst. Vibration	66,6 %	27,0 %	1,6 %	64,1 %	14,9 %	0,8 %
1. Vibr. Hochlauf	73,7 %	28,3 %	2,0 %	69,0 %	18,0 %	0,9 %
1. Fallversuch	80,9 %	40,7 %	22,7 %	74,5 %	26,4 %	10,4 %
2. Fallversuch	84,4 %	56,7 %	44,2 %	79,5 %	36,2 %	23,7 %
3. Fallversuch	88,6 %	65,7 %	58,0 %	83,6 %	46,0 %	37,6 %
4. Fallversuch	91,4 %	76,4 %	75,4 %	87,2 %	57,0 %	51,6 %
5. Fallversuch	91,4 %	85,4 %	86,6 %	90,1 %	69,8 %	62,9 %
6. Fallversuch	95,5 %	89,8 %	97,7 %	93,0 %	75,9 %	70,5 %
7. Fallversuch	89,1 %	96,1 %	111,4 %	95,7 %	83,1 %	79,9 %
8. Fallversuch	98,7 %	99,7 %	118,7 %	98,2 %	89,4 %	89,1 %
9. Fallversuch	100,3 %	108,6 %	125,2 %	100,4 %	96,3 %	93,5 %
10. Fallversuch	100,6 %	112,1 %	130,0 %	101,7 %	101,3 %	100,3 %
2. Vibr. Hochlauf	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

	D08-19-01/04/05/06	D08-28-02	D08-33-03	D09-19-01/04/05/06	D09-30-02	D09-35-03
Konst. Vibration	58,3 %	8,6 %	6,4 %	58,4 %	5,1 %	1,3 %
1. Vibr. Hochlauf	63,0 %	10,4 %	7,7 %	63,5 %	6,0 %	1,5 %
1. Fallversuch	72,0 %	31,5 %	34,3 %	71,1 %	22,2 %	12,3 %
2. Fallversuch	78,5 %	47,5 %	60,2 %	77,5 %	34,4 %	29,1 %
3. Fallversuch	82,9 %	61,5 %	75,3 %	82,2 %	51,0 %	42,2 %
4. Fallversuch	86,4 %	68,3 %	91,3 %	86,5 %	64,3 %	56,0 %
5. Fallversuch	90,5 %	80,9 %	101,5 %	90,2 %	75,3 %	69,1 %
6. Fallversuch	92,5 %	88,8 %	112,1 %	92,9 %	83,4 %	77,7 %
7. Fallversuch	95,3 %	96,2 %	119,4 %	94,7 %	91,8 %	90,0 %
8. Fallversuch	96,9 %	99,3 %	125,2 %	97,7 %	100,4 %	97,0 %
9. Fallversuch	98,4 %	100,6 %	129,5 %	100,1 %	101,9 %	105,7 %
10. Fallversuch	100,4 %	111,3 %	137,1 %	102,7 %	108,0 %	116,8 %
2. Vibr. Hochlauf	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %

	E08-34-01/02/03/04	F08-30-01/02/03/04
Konst. Vibration	57,2 %	59,7 %
1. Vibr. Hochlauf	64,0 %	67,4 %
1. Fallversuch	72,3 %	75,1 %
2. Fallversuch	78,4 %	80,2 %
3. Fallversuch	82,4 %	84,3 %
4. Fallversuch	85,9 %	87,5 %
5. Fallversuch	89,3 %	90,1 %
6. Fallversuch	91,3 %	92,8 %
7. Fallversuch	93,8 %	94,8 %
8. Fallversuch	95,8 %	96,5 %
9. Fallversuch	98,0 %	98,1 %
10. Fallversuch	99,7 %	99,6 %
2. Vibr. Hochlauf	100,0 %	100,0 %



## Anhang 12

## Im Material- und Methodenscreening verwendete Materialien und Zuordnung der Kennziffern

Mat.kennz.	Bezeichnung	Material	Herkunft	Imprägnierung	Aufbereitung
01	FES	Fichte	Kegelstirnplanfräsprozess	-	-
02	Fichte Hobelspan	Fichte	Hobelwerk	-	-
03	Fichte Bandsägespan	Fichte	Hobelwerk	-	-
04	Lärche Hobel-/Bandsägespan	Lärche	Hobelwerk	-	-
05	Fichte Kreissägespan	übw. Fichte	Spanerlinie	-	-
06	Hobeldämmspangemisch	Fichte	untersch. Hobelwerke	Soda und Molke	abgesiebt
07	Holzstoff	-	Extruderprozess	-	-
08	Faserstoff	Kiefer	Refinerprozess	-	-
09	Altpapierflocken	Altpapier	Altpapieraufbereitung	Borsalze	-
10	Wiesengrasdämmstoff	Wiesengras	Wiesengras	-	-
11	Miscanthusspäne	Miscanthus	Miscanthusstängel	-	Hacker
12	Hanfschäben	Hanf	Hanffaserproduktion	-	-
13	Hanffasern	Hanf	Hanfkurzfasern	-	Schneidmühle
14	Flachsschäben	Flachs	Flachsfaserproduktion	-	-
15	Flachsfasern	Flachs	Werg gerissen	-	Schneidmühle

## Im Material- und Methodenscreening untersuchte Mischungsverhältnisse und Zuordnung der Kennziffern

Mat.kennz.	Material A	Anteil A	Material B	Anteil B
M02_1	FES 01	24,4 %	Fichte Hobelspan 02	75,6 %
M04_1	FES 01	22,7 %	Lärche Hobel-/Bandsägespan 04	77,3 %
M07_1	FES 01	32,3 %	Holzstoff 07	67,7 %
M08_1	FES 01	32,3 %	Faserstoff 08	67,7 %
M09_1	FES 01	34,5 %	Altpapierflocken 09	65,5 %
M12_1	FES 01	20,0 %	Hanfschäben 12	80,0 %
M13_1	FES 01	22,7 %	Hanffasern 13	77,3 %
M14_1	FES 01	18,9 %	Flachsschäben 14	81,1 %
M15_1	FES 01	32,3 %	Flachsfasern 15	67,7 %



## Anhang 13

## In den Hauptversuchen verwendete Materialien und Zuordnung der Kennziffern

Mat.kennz.	Bezeichnung	Material	Herkunft	Imprägnierung
H01	FES	Fichte	Kegelstirnplanfräsprozess	-
H02	Fichte Hobelspan	Fichte	Hobelwerk	-
H08	Faserstoff	Kiefer	Refinerprozess	-
H08i	Faserstoff	Kiefer	Refinerprozess	Borsalze und Ammoniumphosphat
H09	Altpapierflocken	Altpapier	Altpapieraufbereitung	-
H09i	Altpapierflocken	Altpapier	Altpapieraufbereitung	Borsalze

## In den Hauptversuchen untersuchte 2-komponentige Mischungsverhältnisse und Zuordnung der Kennziffern

Mat.kennz.	Material A	Anteil A	Material B	Anteil B
A02	FES H01	9,2 %	Fichte Hobelspan 02	90,8 %
B02	FES H01	16,1 %	Fichte Hobelspan 02	83,9 %
C02	FES H01	24,8 %	Fichte Hobelspan 02	75,2 %
D02	FES H01	56,3 %	Fichte Hobelspan 02	43,7 %
A08	FES H01	13,6 %	Faserstoff H08	86,4 %
B08	FES H01	23,1 %	Faserstoff H08	76,9 %
C08	FES H01	33,9 %	Faserstoff H08	66,1 %
D08	FES H01	74,6 %	Faserstoff H08	25,4 %
A09	FES H01	13,3 %	Altpapierflocken H09	86,6 %
B09	FES H01	22,7 %	Altpapierflocken H09	77,3 %
C09	FES H01	33,5 %	Altpapierflocken H09	66,5 %
D09	FES H01	65,9 %	Altpapierflocken H09	34,1 %

## In den Hauptversuchen untersuchte 3-komponentige Mischungsverhältnisse und Zuordnung der Kennziffern

Mat.kennz.	Material A	Anteil A	Material B	Anteil B	Material C	Anteil C
E08	FES H01	19,00 %	Fichte Hobelspan H02	69,70 %	Faserstoff H08	11,30 %
E09	FES H01	19,00 %	Fichte Hobelspan H02	69,50 %	Altpapierflocken H09	11,50 %
F08	FES H01	15,40 %	Fichte Hobelspan H02	53,80 %	Faserstoff H08	30,80 %