Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Mikrostrukturmodellierung zur Optimierung holzfaserbasierter Wärmedämmstoffe

Teilvorhaben 1: Physikalische Charakterisierung und Validierung Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. (FIW)	Förderkennzeichen 22010516
Teilvorhaben 2: Bildanalyse, Geometriemodellierung und Simulation Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)	Förderkennzeichen 22002717
Teilvorhaben 3: Optimierung und Dokumentation der industriellen Produktionsverfahren Steico SE	Förderkennzeichen 22004617

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2017 – 30.06.2020 (kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 31.03.2021)

Monat der Erstellung:

September 2021

Datum der Veröffentlichung:

20.12.2021

Autoren:

Dr. Sebastian Treml (FIW)
Max Engelhardt M.Sc. (FIW)
PD Dr. Heiko Andrä (ITWM)
Dr. Sarah Staub (ITWM)
Dr. Stefan Rief
Dr. Katja Schladitz (ITWM)
Christian Mercier (ITWM)
Dr. Michael Makas (Steico)
Dipl.-Ing. Karol Trawka (Steico)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Adressen und Ansprechpartner:

Forschungsstelle	Ansprechpartner	Kontaktdaten
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. Lochhamer Schlag 4 82166 Gräfelfing www.fiw-muenchen.de	Dr.-Ing. Sebastian Treml	+ 49 (0) 89-85 80 0 - 30 treml@fiw-muenchen.de
	Dipl.-Ing. Christoph Sprengard	+ 49 (0) 89-85 80 0 - 58 sprengard@fiw-muenchen.de
Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik Fraunhofer-Platz 1 67663 Kaiserslautern www.itwm.fraunhofer.de	Dr. Katja Schladitz	+49 (0) 631 / 31 600 – 4625 katja.schladitz@itwm.fraunhofer.de
	Priv.-Doz. Dr. Heiko Andrä	+49 (0) 631 / 31 600 – 4470 heiko.andrae@itwm.fraunhofer.de
Steico SE Otto-Lilienthal-Ring 30 85622 Feldkirchen www.steico.com	Dr. Michael Makas	+ 49 (0) 89-99 15 51-34 m.makas@steico.com
	Dipl.-Ing. Karol Trawka	+48 728869874 ktrawka@steico.pl

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis XVI

I. Ziele 1

I.1 Gesamtziel des Vorhabens 1

I.2 Bezug des Vorhabens zu den Zielen des Förderschwerpunkts 1

I.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens 2

II. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten 3

II.1 Stand der Wissenschaft und Technik 3

II.1.1 Energieeinsparpotentiale im Gebäudebestand 3

II.1.2 Technologie der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen 3

II.1.3 Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen 4

II.1.4 Marktanteile von Holzfaserdämmstoffen 5

II.1.5 Wärmeübertragung in porösen Festkörpern 6

II.1.6 Wirkeffekte auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen 8

II.1.7 Holzanatomie und Faserstrukturen 9

II.1.8 Einflussfaktoren auf die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen (Fasermorphologie und Fasernetzwerke) 10

II.1.8.1 Einflussfaktoren auf die Fasermorphologie 10

II.1.8.2 Einflussfaktoren auf das Fasernetzwerk (räumliche Anordnung der Fasern in der Platte) 11

II.1.9 Bildanalyse und Modellierung 12

II.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers, Vorarbeiten 13

II.2.1 Voruntersuchung zur Modellierung der Wärmeleitfähigkeit von Naturfasernetzwerken 13

II.2.2 Voruntersuchung zum Einfluss der Struktureigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen 15

II.2.3 Voruntersuchungen zur Probenpräparation für die µCT Aufnahmen 16

III. Projektplanung 17

IV. Material und Methoden 18

IV.1 Material 18

IV.1.1 Initiale Beprobung 18
IV.1.2 Beprobung der laufenden Produktion 19
IV.1.3 Industrieversuche 22
IV.1.3.1 Industrieversuch I 22
IV.1.3.2 Industrieversuch II 22
IV.1.3.3 Industrieversuch III 23
IV.1.3.4 Industrieversuch IV 23
IV.2 Methoden 24
IV.2.1 Probenzuschnitt und Lagerung 24
IV.2.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (EN 12667) 24
IV.2.3 Bestimmung der Anteile der Wärmeübertragung 25
IV.2.4 Bestimmung des Emissionsgrades 27
IV.2.5 Verhalten bei Druckbeanspruchung (EN 826) 27
IV.2.6 Bestimmung des Strömungswiderstands (EN 29053) 28
IV.2.7 Bestimmung der Reindichte (Helium-Pyknometer) 28
IV.2.8 Bestimmung des Sorptionsverhaltens 29
IV.2.9 Herstellung von flexibel gebundenen Platten in einem Laborprozess 30
IV.2.10 Durchführung von Siebanalysen 35
IV.2.10.1 Faserstoff 35
IV.2.10.2 Hackschnitzel 36
IV.2.11 Optisches Verfahren zur Ermittlung charakteristischer Fasergrößen 36
IV.2.12 Ermittlung von Rohdichteprofilen 37
IV.2.13 Tomographische Aufnahmen 38
IV.2.13.1 Synchrotronstrahlung 38
IV.2.13.2 µ-CT 41
IV.2.14 Mikrostruktursimulation 43
V. Meilenstein 1: Mikrostrukturcharakterisierung 45
V.1 Physikalische Charakterisierung 45
V.1.1 Wärmeleitfähigkeit 45
V.1.2 Strömungswiderstand 45
V.1.3 Verhalten bei Druckbeanspruchung 46

V.1.4 Wärmeleitfähigkeit als Funktion anderer Variablen ... 47
V.1.5 Rohdichteprofile ... 48
V.1.6 Reindichte und Porosität ... 49
V.1.7 Partikelgrößenanalyse (Fasern und Hackschnitzel) ... 52
V.1.7.1 Optisches Verfahren (2D-Scanner) ... 53
V.1.7.2 Siebanalysen (Fasern) ... 57
V.1.7.3 Siebanalysen (Hackschnitzel) ... 57
V.1.8 Sorptionseigenschaften ... 58
V.2 µ-CT ... 61
VI. Meilenstein 2: Mikrostrukturmodellierung und Multiskalensimulation ... 65
VI.1 Physikalische Untersuchungen ... 65
VI.1.1 Untersuchung der Anteile der Wärmeübertragung ... 65
VI.1.2 Untersuchung der optischen Dichte ... 68
VI.2 Mikrostrukturmodellierung ... 71
VI.3 Multiskalensimulation ... 74
VII. Meilenstein 3: Modellvalidierung ... 77
VII.1 Mikrostrukturuntersuchungen und Simulation der Wärmeleitfähigkeit an Probe 83/85 ... 77
VII.1.1 Physikalische Charakterisierung ... 77
VII.1.2 µCT-Abbildung und qualitative Mikrostrukturanalyse ... 79
VII.1.3 Robuster quantitativer Vergleich der Mikrostruktur anhand der rekonstruierten µCT-Bilder ... 81
VII.1.4 Angepasste Modellstrukturen ... 82
VII.1.5 Materialsimulation ... 83
VIII. Meilenstein 4: Optimierung ... 89
VIII.1 Kontinuierliche Beprobung der Produktion ausgewählter Linien ... 89
VIII.1.1 Auswertungen zur Produktgruppe B4 ... 90
VIII.1.1.1 Korrelationsdiagramm und zusammenfassende Diskussion zum Einfluss unterschiedlicher Variablen auf die Wärmeleitfähigkeit der Variante B4 ... 90
VIII.1.1.2 Auswertungen zu Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit der Variante B4 ... 93

VIII.1.1.3 Hauptkomponentenanalyse der Variante B4 95
VIII.1.2 Auswertungen zur Produktgruppe B5/B6 101
VIII.1.2.1 Korrelationsdiagramm und zusammenfassende Diskussion zum Einfluss unterschiedlicher Variablen auf die Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6 101
VIII.1.2.2 Auswertungen zu Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6 105
VIII.1.2.3 Hauptkomponentenanalyse der Variante B5/B6 106
VIII.1.2.4 Rohdichteprofile 111
VIII.1.2.5 Einfluss von Severity-Factor und spezifischer Stromaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit 112
VIII.1.2.6 Training eines Random Forests für die Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit aus Prozessparametern und Faseranalyse 114
VIII.1.3 Zwischenfazit und Planung der Industrieversuche 117
VIII.2 Industrieversuch I 118
VIII.3 Industrieversuch II 127
VIII.4 Industrieversuch III 131
VIII.5 Industrieversuch IV 133
VIII.6 Zusammenfassende Auswertung zu den Industrieversuchen II – IV 135
IX. Zusammenfassung 141
IX.1 Erzielte Ergebnisse 141
IX.2 Verwertung 145
IX.3 Erkenntnisse von Dritten 146
IX.4 Veröffentlichungen 146
Literatur 147
Anhang I
Teilvorhaben I I
Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens I
Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens I
Teilvorhaben II III
Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens III
Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens IV
Teilvorhaben III V

Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens V

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens V

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbrauch an Holzfaserdämmstoffen in Deutschland in den Jahren 1990 - 2010 [FAO 2013] 6

Abbildung 2: Prinzipielle Abhängigkeit der Anteile der Wärmeübertragungsmechanismen von der Rohdichte bei einer bestimmten Temperatur (faserförmiger Dämmstoff) (links) und Wege des Wärmetransports in einem porösen Material [Schild und Willems 2011] (rechts) 8

Abbildung 3: Querschnitt durch Nadelholztracheiden an der Jahrringgrenze (Picea abies, Fichte) (links) und Querschnitt der Zellstruktur eines Laubholzes (Betula verrucosa, Weißbirke) mit Laubholzfasern und Gefäßen (rechts) [Fengel und Wegener 1989] 9

Abbildung 4: Verteilung der Zellwanddicke (links) und typische Faserlängen- (Tracheiden) und –dickenbereiche (rechts), [Kollmann et al. 1975], [Fengel und Wegener 1989] 10

Abbildung 5 Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen durch Variation der Aufschlussbedingungen und der Produktionsverfahren (Nass- und Trockenverfahren) 12

Abbildung 6: Simulation der Wärmeleitung in zwei verschiedenen Zellulose-Fasernetzwerken mit der gleichen Rohdichte von 240 kg/m^3, jedoch unterschiedlicher Faserorientierung. Links: Oben: Ergebnis der numerischen Simulation der Temperaturverteilung in K bei Aufprägung einer Temperaturdifferenz von 0.13 K (entspricht 5 K/cm) über die z-Achse des Zellulose-Fasermodells. Unten: Ergebnis der numerischen Simulation des Wärmestroms in W/m² bei Aufprägung einer Temperaturdifferenz von 0.13 K über die z-Achse des Zellulose-Fasermodells. 14

Abbildung 7: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit loser Holzfasern von der Rohdichte innerhalb einer Zerfaserungs- und Produktionscharge [STEICO AG 2004] 15

Abbildung 8: REM Aufnahmen von losen Holzfasern zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen in unterschiedlicher Auflösung 16

Abbildung 9: Probenpräparation eines Holzfaserdämmstoffs für Aufnahmen im µCT (links) und Volumenrendering einer rekonstruierten µCTAufnahme einer Holzfaserplatte (rechts) 16

Abbildung 10 Zuschnittplan und Verteilung der Proben, WL = Wärmeleitfähigkeit, DS = Druckspannung, SW = Strömungswiderstand, HP = Helium-Pyknometer, CT = µCT 24

Abbildung 11 Prinzipskizze zum Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeübertragungsmechanismen in Holzfaserdämmstoffe 26

Abbildung 12 Holzfaserpanel mit vakuumdichter Folienumhüllung und angeflanschtem Adapter (Links); Proben eingebaut im Zweiplattenmessgerät mit Turbomolekularpumpe und Drucksensor (Rechts) 26

Abbildung 13 Messprinzip TIR 100 (Quelle: https://www.tir100.de/index.html) 27

Abbildung 14 Prüfaufbau zur Bestimmung der Reindichte (Prinzipskizze) 29

Abbildung 15 Sorptionsmessanlage mit Probekörpern 30

Abbildung 16 Vorbereiten der Mischung zwischen Holzfaser (braun) und Bico (weiß), rechts: Mischung durch pneumatische Verwirbelung 31

Abbildung 17 Mischung zwischen Holzfaser und Bico nach einmaligem Durchlauf – vereinzelte Agglomerate der Bico-Fasern zu erkennen 31

Abbildung 18 Geodätische Längen des Fasermusters LLF16 im Frischzustand (LLF16B0), nach einmaligem (LLF16B1) und dreimaligem (LLF16B3) Durchlauf im Mischer (Auswertung B) 32

Abbildung 19 Laborstreueinrichtung zur Herstellung flexibel gebundener Dämmstoffmatten, Links: Gesamtansicht; Rechts: Streuwalze und Zuführrinne 33

Abbildung 20 Laborstreueinrichtung zur Herstellung flexibel gebundener Dämmstoffmatten, pneumatisch angetriebener traversierenderStreuwagen 33

Abbildung 21 Vorverdichten des Faserkuchens 34

Abbildung 22 Imprägnierung der Bleche mit Trennmittel, Aktivierung der Bico-Faser bei 140°C im Trockenschrank 34

Abbildung 23 Fertige Labor-Flex Matte mit den Maßen 400 x 400 x 40 mm 35

Abbildung 24 Einbettung der Proben in LR White (Links); Versuchsaufbau zur Einbettung der Proben in Epoxidharz EpoFix mit Infiltration unter Vakuum (Mitte, Rechts) 39

Abbildung 25 In Epoxidharz EpoFix eingebettete Proben (Links, Mitte); Auf Endmaß 5 x 5 mm zugeschnittene Probenwürfel 39

Abbildung 26 Versuchsaufbau zur Probenpräparation im gefrorenen Zustand; Wechselweises eintauchen in flüssigen Stickstoff und Wasser (Links); In Kunststoffcontainer überführte und durch Sublimierung in der Vakuumkammer getrocknete Proben mit 5 x 5 mm Querschnitt 40

Abbildung 27 Volumenrenderings von $(650nm)^3$ großen Ausschnitten aus den hochaufgelösten SRµCT Datensätzen der Faserproben F3, F5, F7 (von links). 41

Abbildung 28 Volumenrenderings von $(650nm)^3$ großen Ausschnitten aus den hochaufgelösten SRµCT Datensätzen der Plattenproben B3-B6 (von links). 41

Abbildung 29 Links: Volumenrendering von B0. Visualisiert sind 422 x 494 x 478 Pixel, d.h. ca. 1.4mm x 1.7mm x 1.6mm. Rechts: Ausschnitt mit längs angeschnittenem Faserbündel. 41

Abbildung 30 Ergebnisse für Überblicksscans für B1 mit 12 und mit 3.8µm Voxelkantenlänge und B2 und B7 mit 12µm Voxelkantenlänge (von oben nach unten). Von links nach rechts: Volumenanteilsprofile, repräsentativer Schnitt durch das Grauwertbild und Volumenrendering. 42

Abbildung 31 Fasern (oben), Flöße (Mitte) und Brocken (unten) anhand von µCT Aufnahmen (links) sowie nachgebildet mit GeoDict (rechts) 43

Abbildung 32 Wärmeleitfähigkeit der Varianten B1 – B7, 10°C Probenmitteltemperatur, 15 K Temperaturdifferenz, absolut trocken 45

Abbildung 33 Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7 (Mittelwerte) 46

Abbildung 34 Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7 (Einzelwerte) 46

Abbildung 35 Druckspannung bei 10 % Stauchung der Varianten B1 – B7 47

Abbildung 36 E-modul bei Druckbeanspruchung der Varianten B1 – B7 47

Abbildung 37 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte der Varianten B1 – B7 48

Abbildung 38 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7 48

Abbildung 39 Rohdichteprofile für die Varianten B1, B2, B3, B4 und B7 (Rohdichteprofilmessgerät Dense-Lab) 49

Abbildung 40 Reindichte der Fasern (ohne reject / Bindemittel) und daraus hergestellter Platten/Matten (Mittelwerte)..... 50

Abbildung 41 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Reindichte für die Varianten B1 – B7..... 52

Abbildung 42 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Porosität für die Varianten B1 – B7 52

Abbildung 43 Massenverteilungssumme der Faserlängen (gewichtet nach der Projektionsfläche) der Fasern F1 – F8 (Auswertung A) 53

Abbildung 44 Massenverteilungssumme der Faserdurchmesser (gewichtet nach der Projektionsfläche) der Fasern F1 – F8 (Auswertung A) 54

Abbildung 45 Median der Faserlänge in Gegenüberstellung zum Median des Faserdurchmessers der Fasern F1 – F8 (Auswertung A) 55

Abbildung 46 Flächengewichtete Häufigkeit der Faserlängen; Oben links: F2 (ohne Reject) und F3 (mit Reject); Oben rechts: F4 (ohne Reject) und F5 (mit Reject); Unten links: F6 (mit Reject) und F7 (ohne Reject); Unten rechts: F1 und F8 (Auswertung B) 55

Abbildung 47 Flächengewichtete Häufigkeit von Faserlängen und Faserbreiten als heatmap (Auswertung B) 56

Abbildung 48 Sieblinie der Faserstoffe F3, F5 und F7 57

Abbildung 49 Massenverteilungssumme der Fraktionen aus der Siebanalyse der Hackschnitzelsortimente..... 58

Abbildung 50 Sorptionsfeuchtegehalte bei 23°C / 50 % r. F. und 23°C / 80 % r. F. für die Varianten B1 – B7 (sortiert nach Herstellverfahren) 59

Abbildung 51 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B2 und B4 60

Abbildung 52 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B3 und B4 60

Abbildung 53 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B5 und B6 60

Abbildung 54 Volumenanteile auf Basis der SRµCT-Bilder für Plattenproben B3 und B4. Links: Voxelkantenlänge 3 µm (nur für B3 verfügbar). Rechts: Voxelkantenlänge 650 nm. Aus dem Flächengewicht berechneter Sollwert grau gestrichelt. 61

Abbildung 55 Volumenanteile auf Basis der SRµCT-Bilder für Plattenproben B5 und B6. Links: Voxelkantenlänge 3 µm. Rechts: Voxelkantenlänge 650 nm. Aus dem Flächengewicht berechneter Sollwert grau gestrichelt. 62

Abbildung 56 Segmentierungsergebnisse mithilfe des lokalen Verhältnisses von S zu V. Farben kodieren Objektnummern (links) bzw. Objekttyp (rechts, hellblau – Fasern, dunkelblau – Chips, grün – Brocken). 63

Abbildung 57 Anteile der Wärmeübertragung durch Festkörperwärmeleitfähigkeit, Strahlung und Gaswärmeleitfähigkeit für den Plattentyp B3, Lambda_eq = äquivalente (gemessene) Wärmeleitfähigkeit, Lambda_gas+kopplung = Gaswärmeleitfähigkeit und Kopplungseffekte, Lambda_rad = Anteil der Wärmestrahlung, Lambda_sol = Feststoffwärmeleitfähigkeit 66

Abbildung 58 Anteile der Wärmeübertragung durch Festkörperwärmeleitfähigkeit, Strahlung und Gaswärmeleitfähigkeit für den Plattentyp B7, Lambda_eq = äquivalente (gemessene) Wärmeleitfähigkeit, Lambda_gas+kopplung = Gaswärmeleitfähigkeit und Kopplungseffekte, Lambda_rad = Anteil der Wärmestrahlung, Lambda_sol = Feststoffwärmeleitfähigkeit 67

Abbildung 59 Vergleich der Anteile der Wärmeübertragung im Festkörper, in der Gasphase und durch Wärmestrahlung für die Varianten B3 und B7 68

Abbildung 60 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit schwarz lackierter Metallplatte 70

Abbildung 61 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit Aluminiumfolie auf Metallplatte 71

Abbildung 62 Modellstrukturen, links S1 ohne Faserbündel, rechts S2 mit 20% Faserbündeln 72

Abbildung 63 Modellstruktur S1, links Original Rohdichte, rechts verpresst 72

Abbildung 64 Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln 73

Abbildung 65 Einfluss der Rohdichte auf die Steifigkeit für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln 73

Abbildung 66 Einfluss der Rohdichte auf die effektive Permeabilität für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln 73

Abbildung 67 Vergleich von simulierten und gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für Probe B3 und Vergleich von Rohdichten 74

Abbildung 68 Vergleich von simulierten und gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für Probe B4 und Vergleich von Rohdichten 74

Abbildung 69 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten aus Experiment und den simulierten Teilvolumina Platte B3 75

Abbildung 70 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten aus Experimenten und den simulierten Teilvolumina Platte B4 75

Abbildung 71 Visualisierung der Inputgeometrie für Simulation der Probe B3_1, links Teilvolumen, rechts Gesamtstruktur 76

Abbildung 72 Positionen der Probenentnahme für die µ-CT Untersuchungen, Probe 1 – 5: 40 x 40 x 120 [mm], Probe 6 – 9: 15 x 15 x 120 [mm] (L x B x D) 78

Abbildung 73 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Matten mit hoher (Probe 85) und niedriger (Probe 83) Wärmeleitfähigkeit in einem erweiterten Temperaturbereich 79

Abbildung 74 Links: µCT Messung am ITWM. Rechts: 2D Schnittbild durch Original-3D-Grauwertbild der Probe links. 79

Abbildung 75 Flächendichteprofile über die Plattendicke. 80

Abbildung 76 Porengrößenanalyse anhand der sphärischen Kontaktverteilung. 81

Abbildung 77 Anisotropie der Proben aus 83 und 85, gemessen anhand des Verhältnisses $a=p_{2,z}/S$ für Teil-volumina der Größe 400³ Voxel, was einem Volumen von ca. (5.12 mm)³ entspricht. 82

Abbildung 78 Rekonstruierte µCT-Bilder der Proben aus 83 und 85, jeweils von Position 6 83

Abbildung 79 CT-Aufnahmen (oben) im Vergleich zu den Modellen v5 und v6 (Mitte) sowie v7 (unten) 85

Abbildung 80 Sensitivität der Wärmeleitfähigkeit von Probe 83 in GeoDict 87

Abbildung 81 Temperatur (links) und Wärmefluss (rechts) für die Proben v5 (oben), v6 (Mitte) und v7 (unten) 88

Abbildung 82 Histogramm der Mahalanobis Distanz für die Produktgruppe B5 / B6 vor (links) und nach (rechts) der Bereinigung 89

Abbildung 83 Histogramm der Mahalanobis Distanz für die Produktgruppe B4 vor (links) und nach (rechts) der Bereinigung 89

Abbildung 84 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Variablen der Datenbasis B4, Signifikanzniveau 0.05, nicht signifikante Korrelationen sind ausgekreuzt 90

Abbildung 85 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B4), Größe der Datenpunkte gemäß dritter Variablen 92

Abbildung 86 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B4), Größe der Datenpunkte gemäß Massenanteil der Siebrückstände in den Fraktionen von 0 (Staubanteil) – 8000 µm. 93

Abbildung 87 Mittelwerte und Konfidenzintervall ausgewählter Variablen der Varianten B4, für zwei Teilmengen mit hoher ($\lambda > 0.0370$ W/(m K), N = 23) und niedriger ($\lambda < 0{,}036$ W/(m K), N = 33) Wärmeleitfähigkeit 94

Abbildung 88 Wärmeleitfähigkeit der Variante B4, unterschieden nach Segment-Herstellern A - D.. 95

Abbildung 89 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4, gemäß Tabelle 27 98

Abbildung 90 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4, gemäß Tabelle 28 100

Abbildung 91 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4 (Datenbasis mit eingeschränktem Rohdichtebereich) 101

Abbildung 92 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Variablen der Datenbasis B5/B6, Signifikanzniveau 0.05, nicht signifikante Korrelationen sind ausgekreuzt 102

Abbildung 93 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B5/B6), Größe der Datenpunkte gemäß dritter Variablen 103

Abbildung 94 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B5/B6), Größe der Datenpunkte gemäß Massenanteil der Siebrückstände in den Fraktionen von 0 (Staubanteil) – 8000 µm. 104

Abbildung 95 Mittelwerte und Konfidenzintervall ausgewählter Variablen der Variante B5/B6, für zwei Teilmengen mit hoher (λ > 0.0370 W/(m K), N = 23) und niedriger (λ < 0,036 W/(m K), N = 33) Wärmeleitfähigkeit 105

Abbildung 96 Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6, unterschieden nach Segment-Herstellern A - D 106

Abbildung 97 Korrelationsdiagramm, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B5/B6, gemäß Tabelle 29 108

Abbildung 98 Korrelationsdiagramm, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B5/B6, gemäß Tabelle 30 110

Abbildung 99 Exemplarische Rohdichteprofile an Matten aus der kontinuierlichen Beprobung zur Produktgruppe B5/B6 111

Abbildung 100 Unterschiedliche Ansichten der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B5 112

Abbildung 101 Unterschiedliche Ansichten der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B6 113

Abbildung 102 Durch den Random Forest ermittelter Einfluss der Kenngrößen. 115

Abbildung 103 Korrelation der aggregierten primären Kenngröße T_cook*p_cook mit der Wärmeleitfähigkeit. 116

Abbildung 104 Korrelation der aus der Siebanalyse abgeleiteten Statistiken mit der Wärmeleitfähigkeit. 116

Abbildung 105 Korrelation von Q_4000 mit QU80-QU20 für geringe, mittlere, hohe Wärmeleitfähigkeit. 117

Abbildung 106 Fasermuster der Varianten LLF15 – LLF20 aus dem Industrieversuch I 118

Abbildung 107 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern aus den Faserproben entsprechend Tabelle 32 bei 50 kg/m^3 – Laborflex vs. händisch lose eingestreute Fasern 119

Abbildung 108 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern aus den Faserproben entsprechend Tabelle 32 – Fasertyp LLF17 mit wiederholter Herstellung bei gleicher Zieldichte (50 kg/m3) 121

Abbildung 109 Faserstoffe aus Tabelle 32 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B) 122

Abbildung 110 Flächengewichtete Länge von Faserproben entsprechend Tabelle 32 (Auswertung B) 123

Abbildung 111 Abgesiebte Faserstofffraktionen der Variant LLF17 – von links nach rechts: Grob, Mittel, Fein 124

Abbildung 112 Fraktionen des Faserstoff LLF17 gemäß Tabelle 33 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B) 125

Abbildung 113 Dämmstoffmuster Labor-Flex aus unterschiedlichen Faserproben gemäß Tabelle 32 (links und Mitte) und Fraktionen der Variante LLF17 (rechts 125

Abbildung 114 Orange Linie: Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von Labormustern mit 50 kg/m^3 aus den Faserproben LLF17 (0.0358 W/(m K); Balken: Labormustern aus Fraktionen der Faserproben LLF17 (Tabelle 33) 127

Abbildung 115 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern der Variante LLF17 mit langsamer und schneller Verdichtung des Faserkuchens 127

Abbildung 116 Fasermuster der Varianten LLF21 – LLF 23 aus dem Industrieversuch II 128

Abbildung 117 Faserstoffe aus Tabelle 34- Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B) 129

Abbildung 118 Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 34 130

Abbildung 119 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 34 130

Abbildung 120 Fasermuster der Varianten LLF24 und LLF25 aus dem Industrieversuch III 132

Abbildung 121 Faserstoffe aus Tabelle 37 Tabelle 34- Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap 132

Abbildung 122 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 37 133

Abbildung 123 Fasermuster der Variante LLF26 aus dem Industrieversuch IV 134

Abbildung 124 Faserstoff LLF26 aus Tabelle 40 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap 134

Abbildung 125 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus dem Faserstoff gemäß Tabelle 40. 135

Abbildung 126 Wärmeleitfähigkeit als Funktion von Rohdichte, Severity-Factor und spezifischer Stromaufnahme im Defibrator (Datenbasis: Industrieversuche II – IV) 136

Abbildung 127 Wärmeleitfähigkeit als Funktion von Bandgeschwindigkeit und Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittellage sowie Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittellage als Funktion der Bandgeschwindigkeit (Datenbasis: Industrieversuche II – IV) 137

Abbildung 128 Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Medians der Faserlänge und Faserdurchmessers (Auswertung A) sowie der Zusammenhang zwischen Faserdurchmesser und Faserlänge (Datenbasis: Industrieversuche II – IV) 137

Abbildung 129 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Quantile der Siebanalyse (20 %-, 50 %- und 80 % Quantil) sowie als Funktion der Distanz zwischen 80 %- und 20 %-Quantil (Datenbasis: Industrieversuche II – IV) 138

Abbildung 130 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Größen (Datenbasis: Industrieversuche II – IV) 139

Abbildung 131 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Größen (Datenbasis: Industrieversuche II – IV unter Ausschluss der Variante LLF24) 140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Technische Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen im Vergleich mit Produkten aus Mineralfaser und EPS [1][Schild und Willems 2011], [2][Pfundstein et al. 2007], NV = Nassverfahren, TV = Trockenverfahren, DUK = Umkehrdach, WAA = Außendämmung Wand hinter Abdichtung, PW = Perimeterdämmung Wand, PB = Perimeterdämmung Bodenplatte 5

Tabelle 2 Vergleich ausgewählter Ökobilanzdaten von Holzfaserdämmstoffen im Vergleich mit Produkten aus Mineralfaser und EPS [Ökobaudat 2013], NV = Nassverfahren, TV = Trockenverfahren 5

Tabelle 3 Bezeichnung der Varianten entnommener Platten/Matten (B0 – B7), Herstellverfahren (TV = Trockenverfahren, NV = Nassverfahren, Flex = flexible Matte mit Stützfasern), Fasern (F1 – F8) und Hackschnitzel (HS1 – HS3) sowie die Zuordnung der Proben untereinander 19

Tabelle 4 Parameterumfang der Beprobung 20

Tabelle 5 Errechnete Faktoren 21

Tabelle 6 Probe 83 und Probe 85 zur näheren Untersuchung der Mikrostruktur 21

Tabelle 7 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs I 22

Tabelle 8 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs II (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 23

Tabelle 9 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 23

Tabelle 10 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten) mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 23

Tabelle 11 Probenumfang (initiale Beprobung) 24

Tabelle 12 Siebmaschenweiten zur Ermittlung der Siebkennlinie von Faserstoffen 35

Tabelle 13 Siebmaschenweiten zur Ermittlung der Siebkennlinie von Hackschnitzeln 36

Tabelle 14 Reindichte und Porosität der untersuchten Platten / Matten sowie der Fasern (ohne reject und Additive) (Mittelwerte) 50

Tabelle 15 Theoretische Reindichte basierend auf Mischungen zwischen Holzfaser und Bindemittel (PMDI, Bico) mit 1 – 10 m-% Anteil 51

Tabelle 16 Massebezogene Feuchtegehalte in % (bezogen auf atro) zur Bestimmung der Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B1 – B7 (sortiert nach Herstellverfahren) (grau hinterlegt: Adsorption, ohne Hinterlegung: Desorption) 58

Tabelle 17 Strukturkenngrößen für Teilvolumina der Größe (1.2mm x 1.2mm x 1.4mm) (F3) , (1.9mm x 1.9mm x 1.5mm) (F5) , (1.8mm x 1.8mm x 1.5mm) (F7) der Faserproben. 64

Tabelle 18 Strukturkenngrößen für Teilvolumina der Größe $(1.1mm)^3$ (B5) bzw. (1.1mm x 1.1mm x 1.4mm) (B3, B4, B6) Plattenproben, angegeben sind maximaler und minimaler Wert. 64

Tabelle 19 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit schwarz lackierter Metallplatte 69

Tabelle 20 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit Aluminiumfolie auf Metallplatte 70

Tabelle 21 Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Flex Matten mit hoher/niedriger Wärmeleitfähigkeit, Messdaten zur Temperaturdifferenz an unterschiedlichen Punkten und die Wärmeströme für Kaltseite und Warmseite..... 77

Tabelle 22 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Matten mit hoher (Probe 85) und niedriger (Probe 83) Wärmeleitfähigkeit in einem erweiterten Temperaturbereich..... 78

Tabelle 23 Anisotropie der Struktur anhand der Oberflächennormalenrichtungen. 81

Tabelle 24 Oberflächennormale von CT-Aufnahmen und Modellen sowie die simulierte Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung 84

Tabelle 25 Parameterumfänge zur Auswertung mittels Hauptkomponentenanalyse für die Variante B4 96

Tabelle 26 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 1 97

Tabelle 27 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 2 98

Tabelle 28 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 3 99

Tabelle 29 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 1..... 107

Tabelle 30 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 2..... 108

Tabelle 31 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 3..... 110

Tabelle 32 Ergebnis der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B5 und mögliche Kombinationen von T_cook und Z_cook zur Erreichung des jeweiligen Severity-Factors (Grün < 0.035 W/(m K), 0.035 W/(m K) < Gelb < 0.036 W/(m K), 0.036 W/(m K) < orange < 0.037 W/(m K)) 113

Tabelle 33 Herstellparameter Industrieversuch I..... 118

Tabelle 34 Ergebnisse der Siebung von Fasern des Typs LLF17 124

Tabelle 35 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs II (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 128

Tabelle 36 Fasergrößen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)..... 128

Tabelle 37 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 34..... 129

Tabelle 38 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 131

Tabelle 39 Fasergrößen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)..... 131

Tabelle 40 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 36..... 133

Tabelle 41 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten) mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 133

Tabelle 42 Fasergrößen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten) 134

Tabelle 43 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 36..... 134

I. Ziele

I.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben legt die notwendigen Grundlagen zur Verbesserung der Wärmedämmung von holzfaserbasierten Materialien, indem der Zusammenhang zwischen mikrostrukturellen und effektiven Eigenschaften aufgeklärt, modelliert, simuliert und optimiert wird.

Dies ist für die Weiterentwicklung von Holzfaserdämmstoffen essentiell, um die derzeit gegenüber mineralischen und petrochemischen Produkten bestehenden Nachteile in der Wärmeleitfähigkeit zu überwinden. Bislang nähert man sich lediglich visuell gestützt, iterativ an ein Fasermuster an, mittels Siebanalyse (Trockenverfahren) oder Entwässerungsprobe (Zeit für die Entwässerung der Faserstoffsuspension über ein Sieb nach [Lampert 1967]). Mit diesen Methoden kann keine Korrelation zur Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Hierfür ist ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Produktionsparametern, der Fasermorphologie, der Struktureigenschaften des Materials und der daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit vonnöten.

I.2 Bezug des Vorhabens zu den Zielen des Förderschwerpunkts

Der verstärkte Einsatz von Holzfaserdämmstoffen ist aus Gründen einer nachhaltigen Materialwirtschaft und der Kohlenstoffspeicherung im Sinne einer stofflichen Kaskadennutzung, unter ökologischen aber auch unter gesundheitlichen Gesichtspunkten (Verarbeitung, Nutzung) erstrebenswert. Darüber hinaus bieten die Materialien viele bauphysikalische Vorteile wie eine hohe Wärmespeicherkapazität, hohes Feuchtepuffervermögen und günstige Diffusionseigenschaften (siehe Kapitel II.1.3).

Haupthemmnis beim Einsatz von Holzfaserdämmstoffen ist die im Vergleich zu Konkurrenzprodukten höhere Wärmeleitfähigkeit. Die „Dämmleistung“ eines Wandaufbaus ist in erster Linie abhängig von der Wärmeleitfähigkeit (λ) des Materials und der Dicke (d) des Dämmstoffs und wird durch den so genannten U-Wert (W/(m^2 K)) ausgedrückt, der ein Maß für die Wärmemenge ist, die in einer bestimmten Zeit bei einer Temperaturdifferenz von 1 K über eine Fläche von 1 m^2 übertragen wird. Der U-Wert ist abhängig von den Wärmeübergangs- und Wärmedurchlasswiderständen der am Wandaufbau beteiligten Schichten. Bezogen auf die eingesetzten Dämmstoffe ergibt sich eine Abhängigkeit U ~ λ/d.

Der Einfluss der Dicke auf den U-Wert ist also nicht linear, sondern regressiv ausgebildet. Insbesondere vor dem Hintergrund immer niedrigerer U-Werte aus den verschärften Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) wachsen also die Dämmschichtdicken überproportional stark an, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Produkts gleichbleibt. Die Sanierung einer typischen ungedämmten Fassade mit einem U-Wert von 1,4 W/(m^2 K) auf den Standard der EnEV 14 mit 0,24 W/(m^2 K) erfordert bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/(m K), 14 cm Dämmstoffdicke, während bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,030 W/(m K) nur mehr 11 cm erforderlich sind. Die Verbesserung auf einen Passivhausstandard mit U = 0,10 W/(m^{2}K) würde die erforderlichen Materialstärken auf 38 cm (λ = 0,04 W/(m K)) vs. 28 cm (λ = 0,03 W/(m K)) erhöhen [Sprengard et al. 2014].

Neben optischen (Fensterrücksprünge in der Fassade bei Bestandsertüchtigungen) und montagebezogenen (Anschlussdetails) Problemen wirkt sich dies natürlich auch auf den volumenmäßigen Materialverbrauch und damit auf die Kosten der Sanierungsmaßnahme aus.

Eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen ist daher unter technischen und volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll und unterstreicht die grundsätzlich gegebene Ressourceneffizienz von Dämmstoffen, die sich dadurch auszeichnet, dass der Einsatz des Produkts im Laufe seiner Nutzung ein Vielfaches der Energie einspart, die zu seiner Herstellung aufgewendet wurde.

Bei Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen wird die maximal mögliche Einsatzmenge durch die begrenzte Flächenverfügbarkeit bestimmt. Obwohl die Nutzung von Holz in Deutschland noch nicht ausgereizt ist – die Zuwächse übersteigen deutlich die Nutzung – trägt eine materialextensive Produktentwicklung neben den beschriebenen technologischen Vorteilen auch zu einer Vergrößerung des zukünftig abrufbaren Substitutionspotentials von Produkten aus endlichen Rohstoffen bei. Dieser Effekt wird insbesondere bei einer angestrebten Ausweitung der energetischen und stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Zukunft weiter an Signifikanz gewinnen.

I.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Neueste Entwicklungen von bildgebenden Verfahren zusammen mit seit kurzem verfügbaren leistungsfähigen Computersimulationsverfahren ermöglichen es, die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen auch bei hochkomplexen Mikrostrukturen - wie bei Holzfaserdämmstoffen - zu charakterisieren. Diese Vorgehensweise wird oft als Multiskalenmethode bezeichnet.

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens sind daher

1. die detaillierte morphologische Modellierung der Fasersysteme auf Basis von µCT,
2. die Multiskalen-Modellierung der Wärmeübertragung in Holzfasermaterialien,
3. die Validierung der Modelle anhand von Messungen am Material und
4. die genaue Kenntnis des Einflusses von Produktionsparametern auf die Wärmeleitfähigkeit.

Aus dem vierten Ziel folgt die Einsetzbarkeit der hier gelegten Grundlagen auf die Optimierung der Dämmeigenschaften von Holzprodukten. Diese Multiskalen-Modellierung und -Simulation der Wärmeleitfähigkeit von Naturfaserwerkstoffen ist neu und setzt sich durch sein strategisches Vorgehen von empirischen Herangehensweisen ab.

II. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten

II.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird der Stand der Wissenschaft und Technik bzgl. Energieeinsparpotentialen im Gebäudebestand, den allgemeinen Wärmeübertragungsmechanismen, den Möglichkeiten der Beeinflussung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von faserbasierten Dämmstoffen, den Möglichkeiten der Beeinflussung der Fasermorphologie/-qualität bei der Holzfaserdämmstoffherstellung und den Möglichkeiten der bildgebenden Verfahren, der Bildanalyse und der Simulation von Materialeigenschaften dargestellt.

II.1.1 Energieeinsparpotentiale im Gebäudebestand

Betrachtet man die Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen im Jahr 2012, so nimmt die mechanische Energie mit einem Verbrauchsanteil von ca. 37 % hier den größten Anteil ein, gefolgt von der Raumwärme, die für ca. 29 % des Verbrauchs verantwortlich ist. Eine weiterführende Aufschlüsselung des Verbrauchs nach Sektoren zeigt, dass der Verbrauch an Raumwärme mit einem Anteil von ca. 69 % zum größten Teil auf den Sektor der privaten Haushalte zurückgeführt werden kann [Ziesing 2013]. Insgesamt nimmt also der Endenergieverbrauch zur Beheizung privat genutzter Wohnräume mit rund 20 % vom gesamten Endenergieverbrauch eine überragende Stellung ein und ist gleichzeitig ein Posten mit hohem Einsparpotential.

Seit Einführung der Wärmeschutzverordnung (WSchV) bzw. Energieeinsparverordnung (EnEV) wurden im Neubaubereich bereits große Effizienzsteigerungen erreicht. Trotzdem besteht vor allem im Bestand immer noch großes Optimierungspotential. Über 80 % der Gebäude in Deutschland wurden vor der Einführung der WSchV 1995 gebaut. Betrachtet man innerhalb dieses Bestandsauschnitts die Gebäude mit Bauteilen die überwiegend nicht bis gering modernisiert sind, so sind überschlägig etwa 65 % der Gebäude in Deutschland sanierungsbedürftig [Walberg et al. 2011]. Eine energetische Ertüchtigung allein der sanierungsbedürftigen Bauteile in den Gebäudealtersklassen bis 1978 auf einen Zustand der EnEV 09 würde eine Verringerung der Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle um ca. 46 % bewirken – bezogen auf den gesamten Gebäudebestand wäre dies immerhin noch eine Einsparung von ca. 33 %. Überragende Bedeutung haben hierbei Maßnahmen zur Dämmung der Fassade [Sprengard et al. 2014].

Verstärkte Materialforschung zur Verbesserung der Eigenschaften der eingesetzten Dämmstoffe ist eine essentielle Voraussetzung zur Akzeptanz und Umsetzung der angestrebten Sanierungsfahrpläne.

II.1.2 Technologie der Herstellung von Holzfaserdämmstoffen

Holzfaserdämmstoffe werden entweder im so genannten Nass- oder Trockenverfahren hergestellt. Die Verfahren unterscheiden sich durch die Art des die Fasern umgebenden Mediums im Stadium der Mattenbildung und die Bindemechanismen.

Der eigentliche Faseraufschluss erfolgt bei beiden Produkttypen gleich. Hackschnitzel werden entweder aus Langholz auf Hackern hergestellt oder direkt als Koppelprodukte aus anderen

Verwertungslinien bezogen. Die überwiegend eingesetzten Holzarten sind Fichte und Kiefer aufgrund der guten Verfügbarkeit und der vorhandenen Erfahrung beim Faseraufschluss sowie der gegenüber Laubholz längeren Fasern. Die Hackschnitzel werden zunächst in einem Kocher bei Temperaturen von 160 - 190°C und einem Druck von 6 - 12 bar behandelt. Nach einer definierten Kochzeit verlässt das plastifizierte Material den Kocher und wird der eigentlichen Zerfaserung in einem Refiner zugeführt. Hierbei wird das Material zentrisch zwischen zwei Mahlscheiben eingeschleust und durch die Fliehkräfte der Rotation, die Mahlscheibengeometrie (Riffelung) und den Druckunterschied zwischen Kocher/Refiner und der Blowline (Ausschleusung der Fasern) nach außen gedrückt. Die Zerfaserung erfolgt durch die mechanische Reibung zwischen den Reibelementen der Mahlscheibe und zu einem gewissen Teil auch durch die materialinhärenten Wechseldrücke die sich aus der zyklisch wechselnden Komprimierung entlang der Mahlscheibengeometrie ergeben. Direkt nach der Zerfaserung trennen sich die Herstellungsverfahren. Beim Trockenverfahren werden die Fasern nach dem Verlassen des Refiners in einem heißen Luftstrom (sog. Stromrohrtrockner) getrocknet, danach mit Klebstoff gemischt und trocken mittels geeigneter Streuaggregate zu einer Matte abgestreut.

Beim Nassverfahren werden die Fasern mit einer Stoffkonzentration von ca. 2 - 3 % (Pulp) in einer Bütte in Wasser dispergiert. Der Pulp wird mit einer bestimmten Stoffkonzentration im wässrigen Medium auf ein Langsieb aufgebracht, entwässert und schließlich getrocknet.

Die Bindung der Fasern untereinander wird beim Trockenverfahren entweder durch die Zugabe von Klebstoffen (Polymeres Diphenylmethandiisocyanat PMDI) – man spricht dann von low density fiber boards (LDF), oder durch die Beimengung von Binde- und Stützfasern (Bi-Components-Fasern: Kern aus Polyethersulfon (PES) oder Polypropylen (PP), Mantel aus PP oder Polyethylen (PE) – man spricht dann von flexible fiber boards (FLEX) erreicht.

Beim Nassverfahren sind keine oder geringe (max. 3 %) Zugaben von PF zur Verbesserung der Feuchtebeständigkeit üblich. Die Bindung der Fasern erfolgt hier größtenteils durch mechanische Verfilzung, die Ausbildung von Wasserstoffbrücken und van der Waals Kräften und aufgrund der Plastifizierung des Lignins. [Lampert 1967]

II.1.3 Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen

Die Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen unterscheiden sich je nach Herstellungsverfahren und der Rohdichte der Plattenmaterialien und werden im Folgenden getrennt nach technologischen und ökologischen Parametern im Vergleich mit Mineralwolle (mineralische Fasern) und EPS (petrochemisch hergestellte Schäume auf Basis von Polystyrol) als den wichtigsten Vertretern der herkömmlichen Dämmstoffe gelistet (Tabelle 1).

Tabelle 1 Technische Eigenschaften von Holzfaserdämmstoffen im Vergleich mit Produkten aus Mineralfaser und EPS [1][Schild und Willems 2011], [2][Pfundstein et al. 2007], NV = Nassverfahren, TV = Trockenverfahren, DUK = Umkehrdach, WAA = Außendämmung Wand hinter Abdichtung, PW = Perimeterdämmung Wand, PB = Perimeterdämmung Bodenplatte

Material	ρ[1]	λ[1]	μ[1]	c[1]	Brandklasse[1]	Anwendung[2]
	[kg/m³]	[W/(mK)]	[-]	[J/kg]	DIN 4108	alle außer
Holzfaser	130 – 300 (NV) 40 - 200 (TV)	0,040 - 0,060	5 - 10	2100	B1, B2	DUK, WAA, PW, PB
Mineralfaser	20 - 220	0,035 - 0,050	1 - 2	840	A1, A2, B1	DUK, WAA, PW, PB
EPS	15 - 30	0,032 - 0,040	20 - 100	1500	B1, B2	DUK, WH, WTR

Positiv hervorzuheben ist die hohe spezifische Wärmekapazität (c) von Holzfaserprodukten, die in Verbindung mit der höheren Rohdichte (ρ) insbesondere in Leichtbaukonstruktionen (z.B. Holzrahmenbau (WH), Raumtrennwände (WTR)) einen guten sommerlichen Wärmeschutz (Einsparung von Energie zur Klimatisierung von Räumen im Sommer) und gute Schallschutzeigenschaften ermöglicht. Die Anwendung von Holzfaserdämmstoffen ist in allen Anwendungsgebieten mit Ausnahme von Perimeterdämmungen (PW, PB) und Umkehrdächern (DUK) möglich.

Tabelle 2 zeigt den erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt (PEI) und das Treibhauspotential (GWP). Holzfaserdämmstoffe haben im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen einen niedrigen Anteil des nicht erneuerbaren PEI. Dies ermöglicht eine schnelle energetische Amortisation (= Zeit bis die Dämmmaßnahme mehr Energie einspart, als zur Herstellung benötigt wurde).

Tabelle 2 Vergleich ausgewählter Ökobilanzdaten von Holzfaserdämmstoffen im Vergleich mit Produkten aus Mineralfaser und EPS [Ökobaudat 2013], NV = Nassverfahren, TV = Trockenverfahren

Material	PEI [MJ/kg] nicht erneuerbar.	PEI [MJ/kg] erneuerbar	GWP [kgCO2-eq/kg]
Holzfaser TV	9,1	16,4	-104
Holzfaser NV	10,13	16,8	-230
Mineralfaser	18,8	1,1	1,6
EPS	96,1	0,82	3,3

Ein großer Vorteil unter ökologischen Gesichtspunkten ist außerdem das negative GWP. 1 m³ Holz (entspricht ca. 2,5 m³ Holzfaserdämmstoff) setzt während dem Wachstum fast 1 Tonne CO_2 aus der Atmosphäre um und lagert diese in Form von Kohlenstoff ein. Bei der Sanierung eines durchschnittlichen Einfamilienhauses mit einer Fassaden- und Dachfläche von ca. 325 m² (gemittelte Daten aus [Loga et al. 2011]) werden bei einer mittleren Dämmstoffdicke von 14 cm (Sanierung auf Niedrigenergiehausstandard) rund 45 m³ Dämmstoff verbaut. Dies sind also rund 18 t CO_2-Speicherung allein in der Dämmung – was den CO_2-Emissionen von rund 12 Jahren Autofahren entspricht [Wegener et al. 2010]. Eine anschließende thermische Verwertung ist im Gegensatz zu petrochemisch basierten Produkten CO_2-neutral.

II.1.4 Marktanteile von Holzfaserdämmstoffen

Nach Angaben des GDI lag das Gesamtvolumen der abgesetzten Dämmstoffe in Deutschland im Jahr 2010 bei ca. 28 Mio. m³ und in Europa bei ca. 193 Mio. m³ [GDI 2013]. Diese Zahlen scheinen

optimistisch, verglichen mit Schätzungen anderer Studien die für das gleiche Jahr in Deutschland ca. 20 Mio. m^3 angeben [IC 2013]. Nach Einbrüchen in den Jahren bis 2006 steigen die Absatzzahlen inzwischen wieder an. Die Marktanteile verteilen sich zu 50 % auf Mineralwolle, ca. 27 % auf EPS, ca. 9 % auf XPS, ca. 8 % auf PUR und ca. 6 % auf andere Materialien [IC 2013], darunter fallen auch Holzfaserdämmstoffe, die innerhalb dieser Gruppe auch den größten Anteil einnehmen. Die Einschätzung der Marktanteile der verschiedenen Produktgruppen ist aufgrund von Abgrenzungsschwierigkeiten bei Verbundprodukten und einer allgemeinen Erfassungsproblematik schwierig und liefert nur grobe Anhaltswerte. Insbesondere der Anteil von Naturfaserdämmstoffen wird wahrscheinlich potentiell unterschätzt.

Eine Verbrauchsentwicklung für Holzfaserdämmstoffe lässt sich aus den Statistiken der FAO (Food and Agriculture Organizatioon of the United Nations) ableiten (Abbildung 1).

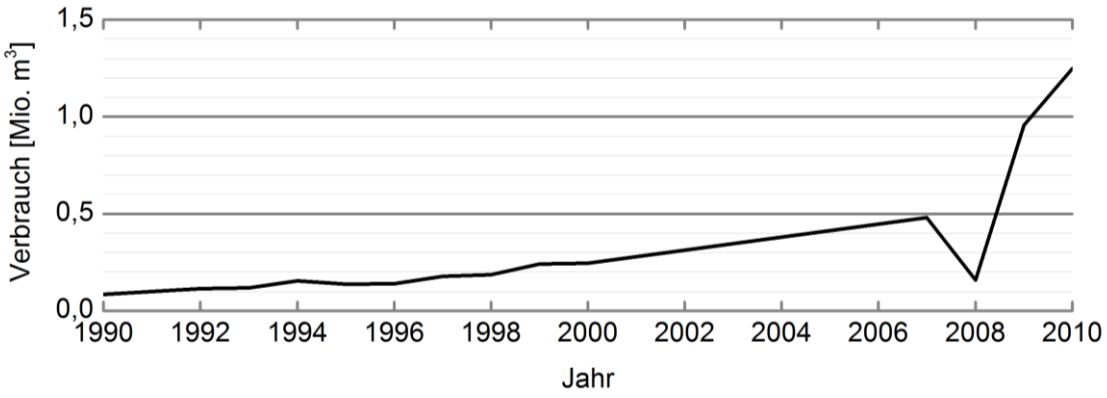


Abbildung 1: Verbrauch an Holzfaserdämmstoffen in Deutschland in den Jahren 1990 - 2010 [FAO 2013]

Wie zu sehen, ist zunächst ein kontinuierlicher, aber schwacher Anstieg ab dem Jahr 1990 zu beobachten. Nach einem Einbruch in den Verbrauchszahlen im Zuge der Wirtschaftskrise im Jahr 2008 schnellt der Verbrauch dann exponentiell in die Höhe. Im Jahr 2010 werden ca. 1,25 Mio. m^3 an Holzfaserdämmplatten verbraucht. Dies allein entspricht ca. 4,5 % - 6,3 % der Gesamtmenge an Dämmstoffen in Deutschland (bezogen auf 21 – 28 Mio. m^3 Gesamtverbrauch). Addiert man hierzu noch ca. 3 % an Dämmstoffen aus rezykliertem Altpapier, so werden die in der Literatur seit Jahren angegebenen 4 – 5 % Marktanteil für alternative Dämmstoffe bereits durch diese zwei Produktgruppen überschritten.

II.1.5 Wärmeübertragung in porösen Festkörpern

Die natürliche Transportrichtung der Wärmeenergie verläuft stets gemäß des Fourierschen Gesetzes von der höheren zur niedrigeren Temperatur und ist auf drei Wärmeübertragungsmechanismen zurückzuführen. Diese sind die Wärmeleitung, also die Übertragung kinetischer Energie zwischen benachbarten Atomen und Molekülen im Feststoff ($\lambda_{L,F}$) und im gasgefüllten Porenraum ($\lambda_{L,G}$), die Wärmeströmung, also die mitgeführte innere Energie eines strömenden Fluids (λ_K) und die Wärmestrahlung, also elektromagnetische Wellen zwischen 0,8 – 800 µm (IR-Strahlung) die nicht an Materie gebunden ist (λ_S) [Schild und Willems 2011]. Das Zusammenwirken der drei Wärmetransportvorgänge in einem porigen Festkörper wird auch als äquivalente Wärmeleitfähigkeit (λ_{eq}) (1) bezeichnet, die neben den genannten Anteilen auch noch von Kopplungseffekten λ_{KE}

bestimmt wird, die in den Zwickeln der punktuellen Kontakte, die dort wirkenden thermischen Widerstände durch enthaltene (Rest-) Luftmoleküle oder adsorbierte Wassermoleküle herabsetzen [Sprengard und Spitzner 2011].

$$\lambda_{eq} = \lambda_{L,F} + \lambda_{L,G} + \lambda_K + \lambda_{S+} \lambda_{KE} \quad (1)$$

Die den einzelnen Anteilen zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung sind in der Literatur einschlägig beschrieben u.a. [Gröber et al. 1981], [Baehr und Stephan 1994]. Berechnungsverfahren zur Wärmeübertragung durch Wärmeleitung im Feststoff werden in [Grigull und Sandner 1986] beschrieben. Werte für die Wärmeleitfähigkeit von Luft und anderen Gasen sind [VDI 2006] zu entnehmen. Ein Einfluss der Porenkonvektion kann sich insbesondere ausbilden, wenn der Dämmstoff luftdurchlässig ist. Ein ausreichend hoher Strömungswiderstand von > 50 kPa*s/m^2 unterbindet dann die Konvektion [VDI 2008]. Der Anteil der Wärmeübertragung durch Strahlung wirkt sich bereits ab Porengrößen von > 0,2 mm signifikant auf die Wärmeleitfähigkeit aus und steigt mit steigender Temperatur (u. a. [Siegel et al. 1988], [Siegel et al. 1991], [VDI 2008]). Bei Dämmstoffen kann auch ein sog. Dickeneffekt beobachtet werden. Bei Rohdichten < 40 kg/m^3 und Dicken < 50 mm sinkt die Wärmeleitfähigkeit mit sinkender Dicke [VDI 2008]. In [Zeitler 2000] wird ein Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe vorgestellt.

Dämmstoffe sind stets poröse Produkte – enthalten also viele kleine, möglichst gegeneinander abgeschlossene Kavitäten, die mit Luft (oder anderen Gasen) gefüllt sein können oder auch weitgehend evakuiert sind (z. B. Vakuum Isolations Paneele (VIP)). Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe haben nach [Cammerer 1995]:

- Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile
- Porosität / Rohdichte
- Art, Größe, Anordnung der Poren und ggf. die anliegenden Temperaturdifferenzen
- Art des Porengases, Gasdruck in den Poren, Gasdurchlässigkeit der Porenwände
- Strahlungseigenschaften der Begrenzungswände der Poren
- Temperatur und Wasser-/Feuchtegehalt

Abbildung 2 zeigt die Wege und qualitativ die Anteile des Wärmetransports in porösen Materialien.

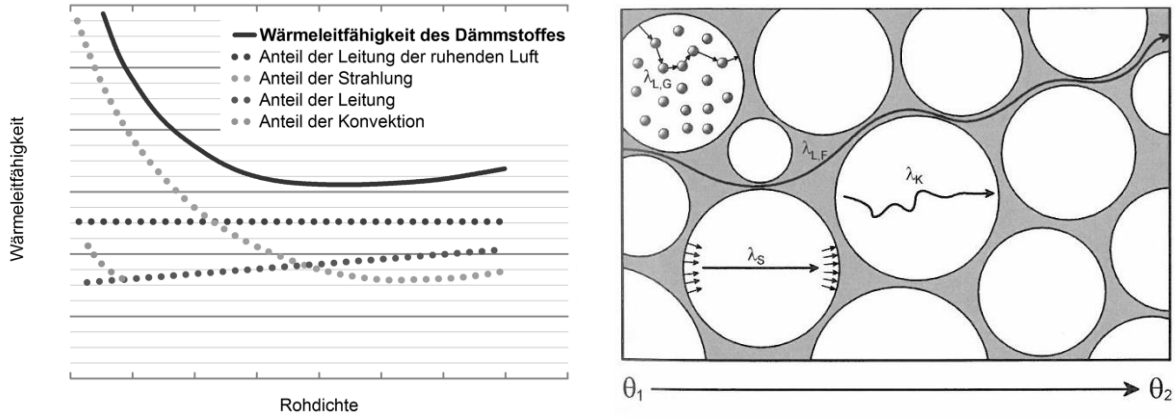


Abbildung 2: Prinzipielle Abhängigkeit der Anteile der Wärmeübertragungsmechanismen von der Rohdichte bei einer bestimmten Temperatur (faserförmiger Dämmstoff) (links) und Wege des Wärmetransports in einem porösen Material [Schild und Willems 2011] (rechts)

II.1.6 Wirkeffekte auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen

Die Wärmeleitfähigkeit von Massivholz ist anisotrop. Entlang der in Längsachse (Faserrichtung) angeordneten Zelluloseketten wird die Wärme leichter übertragen ($\lambda_{Holz\parallel}$), als quer dazu ($\lambda_{Holz\perp}$). Das Verhältnis wird mit $\lambda_{Holz\perp} : \lambda_{Holz\parallel} = 1 : 2 \ldots 1 : 2{,}5$ angegeben [Kollmann und Malmquist 1956]. Die Wärmeleitfähigkeit von Massivholz bewegt sich bei typischen europäischen Holzarten zwischen $\lambda_{Holz\perp} = 0{,}13$ (Fichte, Kiefer, Tanne) bis $\lambda_{Holz\perp} = 0{,}20$ (Buche, Eiche). Wird die native Struktur des Massivholzes in Späne und Fasern aufgelöst und werden die Partikel neu konsolidiert, sind die neuen Struktureigenschaften des so entstandenen Werkstoffs maßgeblich für die Wärmeleitfähigkeit. Hier sind prinzipiell ähnliche Wirkmechanismen zu beobachten wie in obigem Kapitel beschrieben. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit von Holz und Holzwerkstoffen über einen entsprechend großen Rohdichtebereich hinweg auf Basis empirisch und theoretisch ermittelter Formelbeziehungen (u.a. [Kollmann und Malmquist 1956], [Esdorn 2008]) relativ gut bestimmt werden kann, so sind die Abweichungen innerhalb engerer Rohdichtebereiche groß. Die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen war bereits Gegenstand früherer Untersuchungen, die jedoch durchweg empirisch angelegt sind. Als gut dokumentiert gilt der Einfluss der Feinheit des Faseraufschlusses auf die Wärmeleitfähigkeit [Scheiding 2000].

Der Einfluss unterschiedlicher Holzarten auf die Wärmeleitfähigkeit von daraus hergestelltem Faserstoff [Heinrich 2004] und spanbasierten losen Dämmstoffen [Schunk et al. 2009] wird uneinheitlicher bewertet, weil der Einfluss der Mikrostruktur des Einzelpartikels gegenüber der Makrostruktur des Dämmstoffs ungeklärt ist. Grundlegende Untersuchungen zu bauphysikalischen Eigenschaften einer breiten Auswahl an Partikeln aus unterschiedlichen nachwachsenden Rohstoffen und Mischungen daraus finden sich auch bei [Vogel 1999] und [Treml 2011]. Die durchgeführten Untersuchungen beziehen sich aber allesamt auf lose Materialien und enthalten keine weiterführenden Aussagen über die räumliche Strukturausbildung der untersuchten Partikelgemenge. Innerhalb eines Rohstoffsortiments wird jeweils keine oder nur eine geringe Variabilität der Partikelgeometrie untersucht.

Grundlegende Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Fasergeometrie (als Funktion der Aufschlussparameter) und der Struktur von Holzfaserdämmstoffen sind, genauso wie auf gleicher Grundlage erstellte Korrelationen zur Wärmeleitfähigkeit der Produkte, nicht bekannt.

II.1.7 Holzanatomie und Faserstrukturen

Bei Holzfaserdämmstoffen gibt es neben der Makrostruktur, die durch die Anordnung der Fasern zueinander bestimmt wird, auch eine Mikrostruktur, die durch eine Porosität innerhalb der Fasern und Faserbündel gekennzeichnet ist. Die Mikrostruktur ergibt sich dabei aus der Anatomie der eingesetzten Holzart.

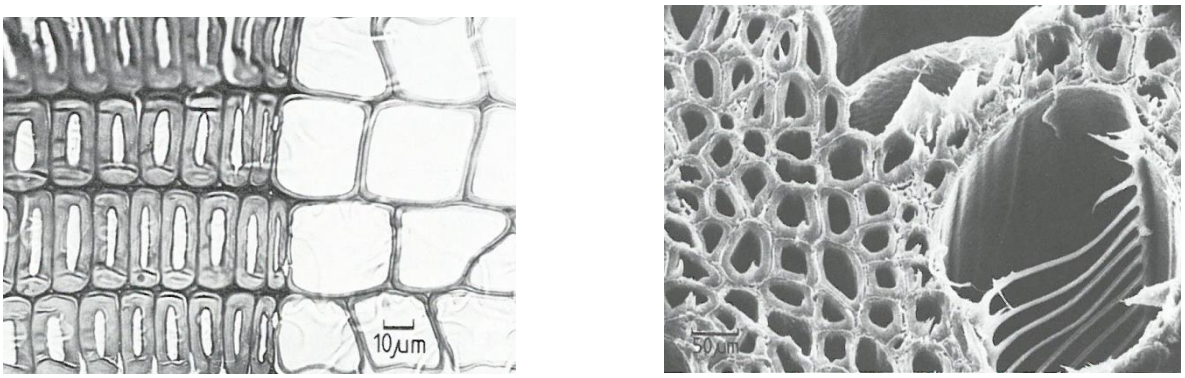
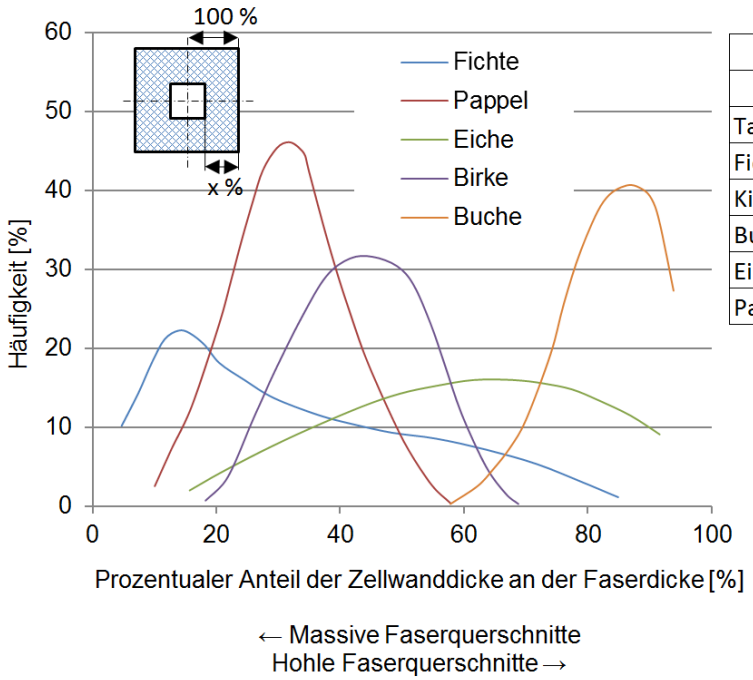


Abbildung 3: Querschnitt durch Nadelholztracheiden an der Jahrringgrenze (Picea abies, Fichte) (links) und Querschnitt der Zellstruktur eines Laubholzes (Betula verrucosa, Weißbirke) mit Laubholzfasern und Gefäßen (rechts) [Fengel und Wegener 1989]

Durch den Faseraufschluss wird der native Verbund des Holzes in die holzartenspezifischen Fasertypen aufgelöst. Dabei unterscheidet sich die Holzanatomie zwischen Nadel- und Laubholz grundsätzlich. Nadelholz besteht zum überwiegenden Teil (90 – 95 %) aus Tracheiden. Diese erfüllen, je nach ihrer Entstehungszeit während der Wachstumsperiode eines Jahres, entweder Leitungs- (Frühholz) bzw. Stützfunktionen (Spätholz) und weisen dementsprechend unterschiedlich ausgebildete Zellwände und Zelllumen auf. Frühholztracheiden sind großlumig, mit dünnen Zellwänden, während Spätholztracheiden kleinere Lumen mit entsprechend dickeren Zellwänden aufweisen (Abbildung 3, links).

Der Querschnitt ist überwiegend quadratisch (Frühholz) bis rechteckig (Spätholz). Bei Reaktionsholz (Druckholz) können sich auch kreisrunde Querschnitte ausbilden. Neben den Tracheiden sind beim Nadelholz noch Anteile an Parenchymzellen vorhanden, die vorwiegend eine Speicherfunktion erfüllen. Bei Laubholz liegt eine insgesamt komplexere Holzanatomie vor. Im Gegensatz zu Nadelholz enthält Laubholz auch bis zu 40 % Gefäßzellen, die im Querschnitt als Poren sichtbar werden (Abbildung 3, rechts). Diese sind entweder von Parenchym- oder Faser- bzw. Libriformzellen umgeben und in charakteristischer Weise über den Querschnitt eines Jahrrings verteilt (ring- bzw. zerstreutporig). Laubholzfasern sind tendenziell kürzer als Nadelholzfasern und dickwandiger. (u.a. [Fengel und Wegener 1989, Grosser 1977, Kollmann und Cote 1968])

Entgegen den Charakteristika künstlicher Fasern sind die geometrischen Kenngrößen von Naturfasern stets unterschiedlich breit gestreut. Typische Bereiche von Zelllänge und –dicke sowie Verteilungen der Zellwanddicke (Bereiche zwischen Voll- und Hohlfaser) zeigt Abbildung 4.



	Faserlänge	Faserdicke
	[mm]	[µm]
Tanne	3.4 - 4.3 - 4.6	25 - 50 - 65
Fichte	1.7 - 2.9 - 3.7	20 - 30 - 40
Kiefer	1.4 - 3.1 - 4.4	10 - 30 - 50
Buche	0.6 - 1.3	15 - 20
Eiche	0.6 - 1.6	10 - 30
Pappel	0.7 - 1.6	20 - 40

Abbildung 4: Verteilung der Zellwanddicke (links) und typische Faserlängen- (Tracheiden) und –dickenbereiche (rechts), [Kollmann et al. 1975], [Fengel und Wegener 1989]

Zur thermischen Charakterisierung von Holzfasern auf Basis von Versuchen an Einzelfasern sind keine Untersuchungen bekannt. Die Zellwand der Holzfasern hat holzartenunabhängig eine Reindichte von ca. 1450 kg/m^3 und weist eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,38 W/(mK) auf [Kollmann und Malmquist 1956] (Bestimmung an komprimierten Massivholzproben).

II.1.8 Einflussfaktoren auf die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen (Fasermorphologie und Fasernetzwerke)

Die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen wird sowohl von der Morphologie der Einzelfasern und Faserbündel, als auch von der Produktionstechnik zur Konsolidierung dieser Einzelpartikel zu Fasernetzwerken bestimmt.

II.1.8.1 Einflussfaktoren auf die Fasermorphologie

Einfluss auf die in industriellen Prozessen herstellbare *Fasermorphologie* haben neben der Holzart in erster Linie die Vorbehandlung der Hackschnitzel im Kocher und die Mahlbedingungen im Refiner. Die Holzart beeinflusst wie beschrieben die Faserlänge, Faserlängenverteilung und die Zellwanddicke (Voll- bis Hohlfasercharakter). Je nach Qualität und Lagerung(-dauer) der Hackschnitzel vor der Verarbeitung sind Abbauprozesse aufgrund mikrobiellen Befalls möglich. Die Vorbehandlung der Hackschnitzel im Kocher soll eine möglichst gute Plastifizierung/Erweichung des Materials ermöglichen. Einflussfaktoren sind hierbei die Größe/Stückigkeit der Hackschnitzel, Temperatur, Druck und Kochzeit.

Bei der eigentlichen Zerfaserung im Refiner sind die Mahlscheibengeometrie, -abstand (Mahlspalt), -abnutzung und die Druckdifferenz zwischen Kocher und Blowline entscheidend für den

Faseraufschluss. Neben den rein technologisch orientierten Parametern sind auch energetische und kostentechnische Randbedingungen zu beachten (u.a. [Lönnberg 2009], [Roll 2010]).

Je nach Qualität des Faseraufschlusses entstehen Einzelfasern und Faserbündel, deren Verteilung charakteristisch für die genannten Parameter aus Rohstoff und Anlagensetup ist. Die Ausprägung der Einflüsse auf die tatsächliche Faserstruktur ist aber weitgehend unbekannt. Da es bislang keine ausreichend exakte Modellierung der Struktur von Holzfaserdämmstoffen gibt, gibt es auch keine exakten Strukturparameter, mit denen sich die Produktionsparameter korrelieren ließen.

II.1.8.2 Einflussfaktoren auf das Fasernetzwerk (räumliche Anordnung der Fasern in der Platte)

Wie in Kapitel II.1.2 beschrieben sind produktionstechnisch das Nassverfahren sowie das Trockenverfahren (LDF und FLEX) zu unterscheiden.

Beim Nassverfahren wird die Struktur der Platte in erster Linie durch Mischungen unterschiedlicher Mahlgrade und Faserzusammensetzungen sowie die Möglichkeiten zur Kontrolle des Entwässerungsvorgangs beeinflusst.

Verschiedene Faserkollektive (siehe Kapitel II.1.8.1) können wie beschrieben durch Variation im Holzaufschluss erzielt und anschließend in Mischbütten für die weitere Verarbeitung aufbereitet werden. Der Entwässerungsvorgang kann auf dem Langsieb durch unterschiedliche Siebe, variierende Vorschubgeschwindigkeiten und die Anwendung von Vakua kontrolliert werden.

Beim Trockenverfahren gilt es wie beschrieben die Herstellung von nicht flexiblen (LDF) und flexiblen Platten (FLEX) zu unterscheiden. Bei der Herstellung von LDF kann insbesondere durch die Einstellung der Streuköpfe (Abstand der Streuwalzen, Winkel des Streukopfs), des Einlaufwinkels der Vorpresse und des Einlaufs der Dampfpresse die räumliche Anordnung der Fasern beeinflusst werden.

Bei der Herstellung von FLEX Platten können die beschriebenen Einstellungen der Streumaschine und der Einlaufwinkel der Vorpresse zur Variation der Strukturparameter genutzt werden.

In Abbildung 5 sind die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen getrennt nach Nass- und Trockenverfahren dargestellt.

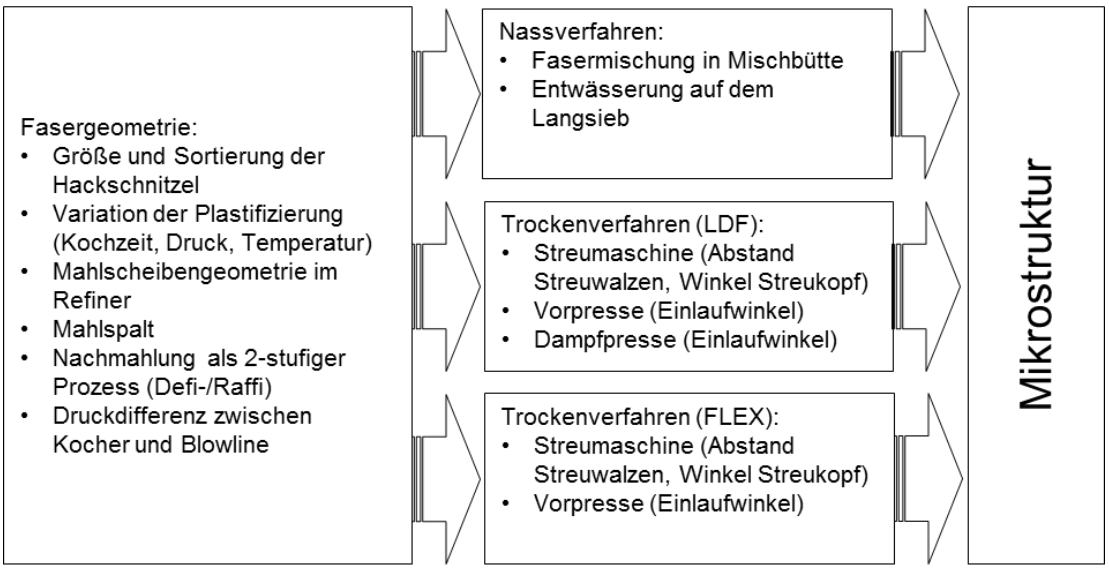


Abbildung 5 Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Mikrostruktur von Holzfaserdämmstoffen durch Variation der Aufschlussbedingungen und der Produktionsverfahren (Nass- und Trockenverfahren)

II.1.9 Bildanalyse und Modellierung

Aufgrund der feinen Mikrostruktur und des geringen Absorptionskontrasts von Zellulosefasern waren bis vor wenigen Jahren nur wenige, meist mit Mikro-Computertomografie (µCT) auf der Basis von Synchrotronstrahlung gewonnene, dreidimensionale Bilder der Mikrostruktur von Naturfaserprodukten verfügbar. Modelle der Mikrostruktur z. B. mitteldichter Faserplatten (MDF) und von Papier verschiedenster Komplexität werden sowohl im akademischen als auch in der industrienahen Forschung bereits eingesetzt. Die Geometriemodelle spiegeln jedoch stets nur wenige Charakteristika der Mikrostruktur korrekt wieder. Eine Modellanpassung auf der Basis von Bilddaten findet bisher nicht statt, ebenso werden keine komplexen Merkmale wie Kovarianz, lokale Porengrößen oder Faserrichtungsverteilung mit realen Bilddaten verglichen.

Zur geometrischen Charakterisierung dreidimensionaler Bilddaten von Naturfaserwerkstoffen eignen sich prinzipiell Bildanalysealgorithmen der Porenräume [Rieber et al. 2010] oder des Fasersystems [Wirjadi et al. 2013]. Obwohl die meisten dieser Verfahren für die Analyse von Materialien wie glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen entwickelt wurden, wird erwartet, dass sie sich in ähnlicher Art und Weise auf Naturfasern übertragen lassen werden. Hierzu müssen jedoch die speziellen morphologischen Eigenschaften natürlicher Fasern berücksichtigt werden (Lumen, starke Varianz der Formen, Dicken und Längen).

Einfache Geometriemodelle für Faserstrukturen, deren Modellparameter anhand von Bilddaten bestimmt werden können, sind anisotrope Poissonsche Zylindersysteme. Dies sind Vereinigungsmengen dilatierter Geraden, die unabhängig identisch verteilt sind. Modellparameter sind Faserlängendichte bzw. Anzahl der Zylinder pro Volumeneinheit sowie Richtungsverteilung und Form und Größe der Faserquerschnitte

In Poissonschen Zylindersystemen gibt es keinerlei Wechselwirkung zwischen den Fasern. Insbesondere können sich die Fasern auch vollständig durchdringen. Realitätsnäher sind Hard- oder

Softcore-Fasersysteme, die Durchdringung ausschließen oder begrenzen. Diese können z.B. mithilfe des Random-Sequential-Adsorption- (RSA) bzw. Sequential-Spatial-Inhibition-Algorithmus' erzeugt werden. Auch Sedimentationsmodelle und das Packungsmodell von [Altendorf und Jeulin 2011] sind geeignet. In diesem Projekt wird der Fokus jedoch zunächst auf eine genaue Modellierung der Einzelfasermorphologie, der Richtungsverteilung und der Dichtegradienten gelegt. Die Modellierung nicht-überlappender Fasern, welche mit einem wesentlich höheren Rechenaufwand einhergeht, könnte in Zukunft auf Basis der Erkenntnisse bzgl. Fasermorphologie und –verteilung aus dem aktuellen Projekt erfolgen.

Seit ca. 15 Jahren werden Softwaresysteme entwickelt, die deterministische oder stochastische Strukturen generieren und in den Realisierungen Materialeigenschaften numerisch simulieren. Für Fasersysteme werden Pakka, PaperSim , GeoDict [GeoDict 2021] und Wisetex bereits kommerziell genutzt. Wisetex ist auf gewebte Strukturen spezialisiert, insbesondere können nur deterministische Strukturen erzeugt werden, die die Variabilität z. B. von Holzfaserplatten nicht wiederspiegeln. Ein Beispiel für einen stochastischen Strukturgenerator ist Pakka, welcher mit einem Sedimentationsalgorithmus Systeme von Fasern mit rechteckigem Querschnitt erzeugt, isotrop in der x-y-Ebene [Niskanen und Alava 1994]. Füllstoffe können ergänzt werden. Allen existierenden Strukturgeneratoren ist gemein, dass ein Vergleich mit aus Bildern gewonnenen Kenngrößen der Struktur nicht stattfindet. Insbesondere können Charakteristika der Mikrostruktur wie Bindungsflächen und Kontaktzahlen und Größen zweiter Ordnung wie Kovarianz oder Kovariogramm nicht überprüft werden.

II.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers, Vorarbeiten

Der folgende Abschnitt zeigt die prinzipielle Machbarkeit des gewählten Forschungsansatzes anhand exemplarisch durchgeführter Voruntersuchungen zu den Themen „Modellierung der Wärmeleitfähigkeit von Naturfasernetzwerken“, „Einfluss der Struktureigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen“ und „Probenpräparation für die µCT-Aufnahmen“.

II.2.1 Voruntersuchung zur Modellierung der Wärmeleitfähigkeit von Naturfasernetzwerken

Am Fraunhofer ITWM wurde als Vorarbeit die effektive Wärmeleitfähigkeit aus der simulierten Wärmeleitung in einem Zellulose-Fasernetzwerk berechnet.

Dazu wurde zunächst unter Verwendung einer Faserlängenverteilung, einer Faserorientierungsverteilung und einer Rohdichte von 240 kg/m³ ein Fasernetzwerk in einem Volumenelement erzeugt, siehe Abbildung 6.

Die Struktur wurde in 200 x 200 x 127 Voxel (Würfel) mit einer Kantenlänge von 2 µm diskretisiert. In der linken und rechten Mikrostruktur in Abbildung 5 ist die Faserverteilung isotrop in der Plattenebene (*x*-*y*-Ebene). Jedoch gibt es in der linken Mikrostruktur weniger Fasern, die in Dickenrichtung (z-Richtung) orientiert sind als in der rechten Mikrostruktur.

Zur Simulation der stationären Wärmeleitung wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 0.235 W/(m K) für die Zellulose [Eitelberger und Hofstetter 2011] und von 0.024 W/(m K) für die ruhende Luft zwischen den Fasern angenommen. Wärmestrahlungseffekte wurden einfachheitshalber vernachlässigt.

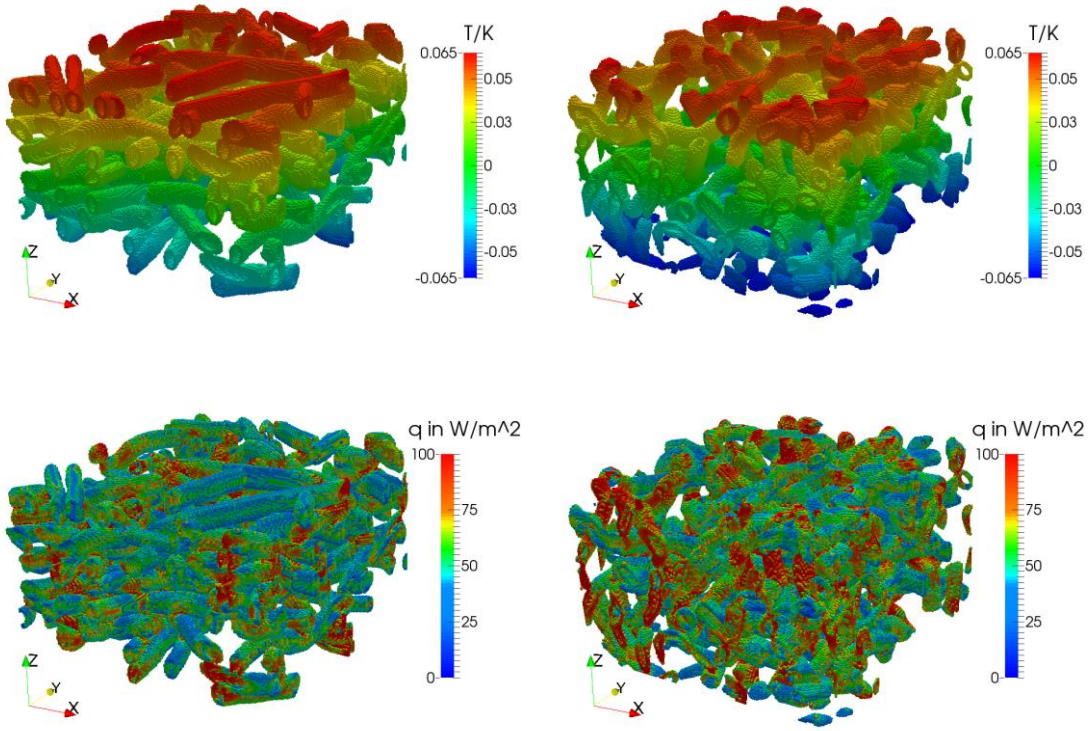


Abbildung 6: Simulation der Wärmeleitung in zwei verschiedenen Zellulose-Fasernetzwerken mit der gleichen Rohdichte von 240 kg/m^3, jedoch unterschiedlicher Faserorientierung. Links: Oben: Ergebnis der numerischen Simulation der Temperaturverteilung in K bei Aufprägung einer Temperaturdifferenz von 0.13 K (entspricht 5 K/cm) über die z-Achse des Zellulose-Fasermodells. Unten: Ergebnis der numerischen Simulation des Wärmestroms in W/m² bei Aufprägung einer Temperaturdifferenz von 0.13 K über die z-Achse des Zellulose-Fasermodells.

Für eine Temperaturdifferenz von 0.13 K zwischen jeweils zwei gegenüberliegenden Seitenflächen wurden die Temperatur und der Wärmefluss berechnet. Die Ergebnisse für die *z*-Richtung sind in Abbildung 6 dargestellt. Man erkennt in Abbildung 6 (unten rechts), dass die Wärmeflüsse in den Fasern höher sind, die stärker in *z*-Richtung orientiert sind. Ein mathematisches Homogenisierungsverfahren liefert aus jeweils drei Simulationen den Tensor der effektiven Wärmeleitfähigkeit für die linke bzw. rechte Mikrostruktur:

$$\lambda_{links} = \begin{pmatrix} 0.0427 & 0.0012 & 0.0003 \\ 0.0012 & 0.0414 & -0.0002 \\ 0.0003 & -0.0002 & 0.0395 \end{pmatrix} \frac{W}{m\,K} \tag{2}$$

$$\lambda_{rechts} = \begin{pmatrix} 0.0415 & -0.0006 & 0.0002 \\ -0.0006 & 0.0407 & -0.0006 \\ 0.0002 & -0.0006 & 0.0417 \end{pmatrix} \frac{W}{m\,K} \tag{3}$$

Die berechneten Wärmeleitfähigkeiten stimmen bereits relativ gut mit entsprechenden Messergebnissen überein (vgl. Tabelle 1). In der linken Mikrostruktur in Abbildung 5 ist die Wärmeleitfähigkeit in *z*-Richtung kleiner, da die Fasern stärker in die *x*- und *y*-Richtung orientiert sind als in der rechten Mikrostruktur. Damit wurde bestätigt, dass die Methodik grundsätzlich geeignet ist, den Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und effektiver Wärmeleitfähigkeit zu analysieren.

II.2.2 Voruntersuchung zum Einfluss der Struktureigenschaften auf die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen

Innerhalb einer Fasermischung (eines Plattentyps) lässt sich die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte darstellen (Abbildung 7, Fasermischung A). Entsprechend der Entwicklung der Anteile von Strahlung und Konvektion stellt sich ein individuelles Minimum ein. In vorliegender Messreihe liegt dieses bei ca. 60 kg/m³.

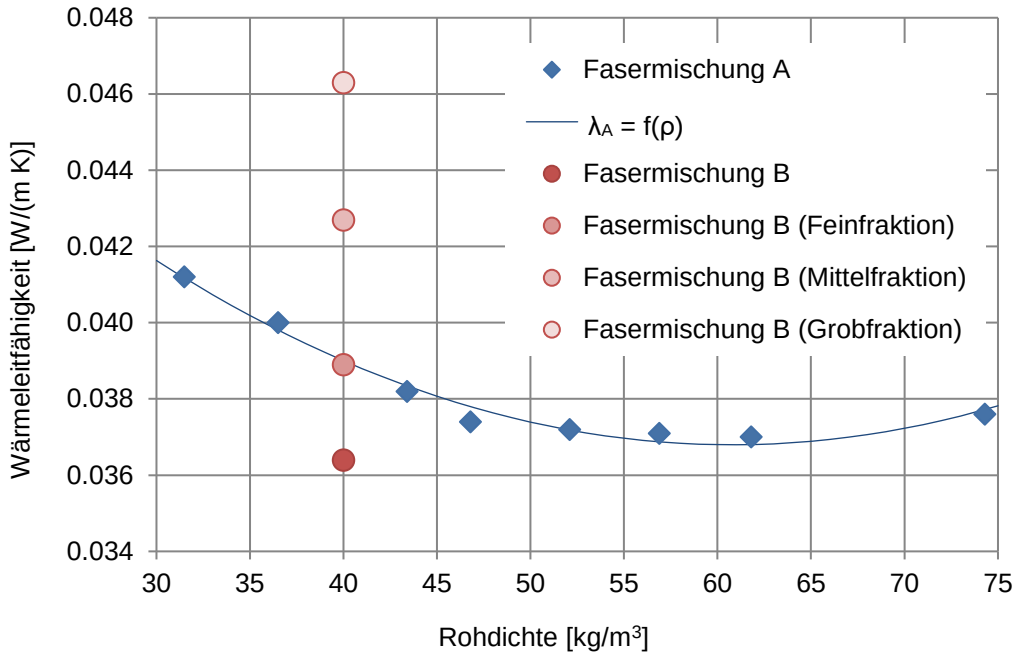


Abbildung 7: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit loser Holzfasern von der Rohdichte innerhalb einer Zerfaserungs- und Produktionscharge [STEICO AG 2004]

Der dargestellte polynomiale Zusammenhang gilt jedoch nur für eine konkret gemessene Faser- und Produktionsstruktur und ist je nach Produkt und Herstellverfahren (Mattenbildung) individuell ausgeprägt (d.h. horizontal oder vertikal verschoben). Hier kommt der Einfluss der Holzanatomie (Mikrostruktur der Einzelfaser, Faserbündel) und der Güte des Faseraufschlusses und der Produktionsbedingungen (verantwortlich für die Makrostruktur) zum Tragen.

Deutlich wird dies bei einem Vergleich der Messwerte der Fasermischung A mit den Messwerten der Fasermischung B (Abbildung 7), die bei einer Rohdichte von 40 kg/m³ eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit zeigt. Wird die Fasermischung B durch Siebung fraktioniert (orientierend: Feinfraktion 0.25 < x < 1.00 [mm]; Mittelfraktion 1.00 < x < 8.00 [mm]; Grobfraktion x > 8.00 [mm]) und werden die Wärmeleitfähigkeiten der Teilfraktionen wieder bei 40 kg/m³ gemessen, so stellen sich für

jede Fraktion trotz gleicher Rohdichte wieder individuelle Faserstrukturen ein, die sich in der Wärmeleitfähigkeit differenzieren.

Die orientierenden Untersuchungen zeigen die Bandbreite des Einflusses von Fasergrößenverteilung und individueller Fasernetzwerkstruktur auf die Wärmeleitfähigkeit.

II.2.3 Voruntersuchungen zur Probenpräparation für die µCT Aufnahmen

Um erste Anhaltspunkte über die anzustrebende Probengröße für die µCT Aufnahmen zu erhalten, wurden REM Aufnahmen von typischen Fasergemischen zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen angefertigt (Abbildung 8).

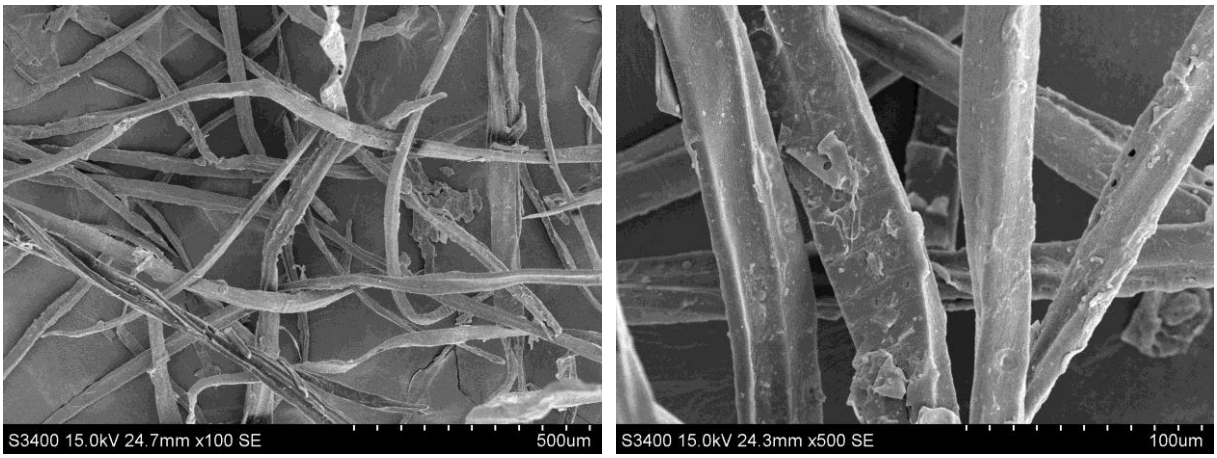


Abbildung 8: REM Aufnahmen von losen Holzfasern zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen in unterschiedlicher Auflösung

Um die nötige Auflösung im Bereich von 1 – 100 µm zu erreichen, werden Proben mit Kantenlängen im Bereich weniger Millimeter bis max. 1 cm benötigt. Die Präparation entsprechender Probenwürfel ist sowohl für matten- als auch plattenförmige Holzfaserdämmstoffe möglich (exemplarisch Abbildung 9 links). Ein orientierendes Beispiel für einen µCT Scan eines Probenwürfels mit 4 mm Kantenlänge aus einer Holzfaserdämmstoffplatte zeigt Abbildung 9 rechts.

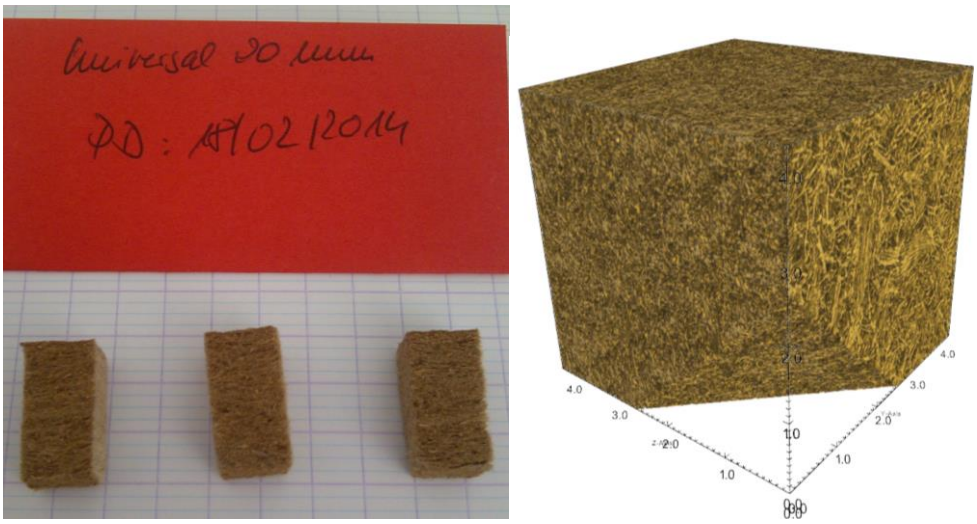


Abbildung 9: Probenpräparation eines Holzfaserdämmstoffs für Aufnahmen im µCT (links) und Volumenrendering einer rekonstruierten µCTAufnahme einer Holzfaserplatte (rechts)

III.Projektplanung

Die Bearbeitung des Projekts orientiert sich an folgenden Zielen (Meilensteine).

Meilenstein 1: Mikrostrukturcharakterisierung

Zunächst werden nach gegenwärtigem Stand der Technik hergestellte Holzfaserdämmplatten in unterschiedlichen Produktionsverfahren (Nass- und Trockenverfahren, flexible Matten) hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe, der Produktionsbedingungen und mikrostrukturell durch tomografische Aufnahmen charakterisiert. Die physikalisch relevanten Eigenschaften werden messtechnisch ermittelt. Damit stehen inhaltlich geschlossene Datensätze als Grundlage für die weitere Modellentwicklung und –validierung zur Verfügung.

Meilenstein 2: Mikrostrukturmodellierung und Multiskalensimulation

Mit Hilfe der Datensätze aus Meilenstein 1 stehen validierte Modelle zur Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit auf Fasernetzwerkebene zur Verfügung. Effekte der Wärmeleitung und Wärmestrahlung sowie von Wärmeübertragungsmechanismen an Faserkontaktstellen werden berücksichtigt. Im Weiteren werden Methoden zur Überführung tomographischer Aufnahmen von Fasernetzwerken in parametrierbare geometrische Modelle entwickelt.

Meilenstein 3: Modellvalidierung

Durch Variation der Herstellverfahren sind die Bandbreite möglicher Variationen der Fasermorphologie und deren Einflüsse auf die Mikrostruktur durch die Mattenlegung eingegrenzt. Die Multiskalensimulationen werden durch erneuten Abgleich mit physikalisch ermittelten Messwerten validiert.

Für die anschließende Optimierung stehen Sensitivitätsanalysen zum Einfluss der Produktionsparameter auf die Strukturparameter und zum Einfluss der Strukturparameter auf die Wärmeleitfähigkeit zur Verfügung.

Meilenstein 4: Optimierung

Mit Hilfe der Methode des virtuellen Materialdesigns sind Produkte mit optimierter Wärmeleitfähigkeit bei gebrauchstauglichen Festigkeiten entwickelt.

Meilenstein 5: Projektabschluss

Das Projekt wird dokumentiert und abgeschlossen

Die Berichterstattung über die Ergebnisse wird anhand der vorgestellten Meilensteine gegliedert.

IV. Material und Methoden

Im Folgenden werden das verwendete Material und die Methoden beschrieben. Die Vorstellung folgt nicht zwangsläufig der Reihenfolge der Bearbeitung in der Projektphase, sondern orientiert sich an der jeweils thematischen Zuordnung.

IV.1 Material

Grundlage der Untersuchungen war zunächst die Entnahme von repräsentativen, industriell hergestellten Produkten aus unterschiedlichen Produktionsverfahren (IV.1.1). Im weiteren Projektverlauf wurden kontinuierlich Materialmuster aus der Produktion entnommen und die Ergebnisse statistisch ausgewertet (IV.1.2). Außerdem wurden eine Reihe von Industrieversuchen durchgeführt (IV.1.3).

IV.1.1 Initiale Beprobung

Die initiale Beprobung umfasste sieben unterschiedliche Typen von Holzfaserdämmstoffen aus drei verschiedenen Verfahren. Dabei wurden sowohl Platten / Matten entnommen, als auch ungebundene Fasern und Muster der Hackschnitzel.

Tabelle 3 fasst die Bezeichnungen der Muster zusammen. Die einzelnen Positionen sind im Folgenden erklärt.

B0 ist eine im Trockenverfahren hergestellte Dämmplatte. Zu dieser Variante liegen keine Hackschnitzelproben und losen Fasern vor.

B1 und B2 sind im Nassverfahren hergestellte Dämmplatten mit unterschiedlicher Rohdichte. Zugeordnet sind die Hackschnitzel HS1 und losen Fasern F1.

B3 und B4 sind im Trockenverfahren hergestellte Dämmplatten mit unterschiedlicher Rohdichte. Zugeordnet sind die Hackschnitzel HS2 und losen Fasern F2 (direkt nach der Zerfaserung) und F3 (mit Zugabe von Anteilen aufbereiteter Produktionsreste). In der Platte verarbeitet sind Fasern vom Typ F3.

B5 und B6 sind im Trockenverfahren mit flexiblen Stützfasern hergestellte Dämmplatten mit unterschiedlicher Rohdichte. Für die Matte B5 sind Hackschnitzel HS2 sowie lose Fasern F4 (direkt nach der Zerfaserung) und F5 (mit Zugabe von Anteilen aufbereiteter Produktionsreste) verarbeitet. Für die Matte B6 sind es analog HS2 sowie die Fasern F6 und F7.

B7 ist eine im Nassverfahren hergestellte Dämmplatte. Zugeordnet sind die HS3 und Faser F8.

Die Fasern aus dem Nassverfahren Prozess wurden mit einer Stofffeuchte von ca. 50 m-% entnommen und zunächst bei 70°C getrocknet. Durch die Agglomerationen konnte keine Siebanalyse durchgeführt werden. Die Fasern wurden aber mechanisch aufgeschlossen und in einem 2D-Scan Verfahren vermessen.

Tabelle 3 Bezeichnung der Varianten entnommener Platten/Matten (B0 – B7), Herstellverfahren (TV = Trockenverfahren, NV = Nassverfahren, Flex = flexible Matte mit Stützfasern), Fasern (F1 – F8) und Hackschnitzel (HS1 – HS3) sowie die Zuordnung der Proben untereinander

Bez.	Verf.	Zuordnung	Dicke	Besonderheiten
B0	TV	-	60 mm	
B1	NV	HS1 -> (F1) -> **B1**	12 mm	
B2	NV	HS1 -> F1 -> **B2**	15 mm	
B3	TV	HS2 -> F2 -> F3 -> **B3**	60 mm	
B4	TV	HS2 -> F2 -> F3 -> **B4**	80 mm	
B5	Flex	HS2 -> F4 -> F5 -> **B5**	100 mm	
B6	Flex	HS2 -> F6 -> F7 -> **B6**	100 mm	
B7	NV	HS3 -> F8 -> **B7**	21 mm	
F1	NV	HS1 -> **F1** -> B2		Entnahme mit 50 M-%, Trocknung bei Steico @ 70°C
F2	TV	HS2 -> **F2** -> F3 -> B3, B4		ohne Reject-Anteil
F3	TV	HS2 -> F2 -> **F3** -> B3, B4		mit Reject-Anteil
F4	Flex	HS2 -> **F4** -> F5 -> B5		ohne Reject-Anteil
F5	Flex	HS2 -> F4 -> **F5** -> B5		mit Reject-Anteil
F6	Flex	HS2 -> **F6** -> F7 -> B6		ohne Reject-Anteil
F7	Flex	HS2 -> F6 -> **F7** -> B6		mit Reject-Anteil
F8	NV	HS3 -> **F8** -> B7		Entnahme mit 50 M-%, Trocknung bei Steico @ 70°C
HS1	NV	**HS1** -> F1 -> (B1), B2		50 % Kiefer, 50 % Fichte, ca. 14 Tage gelagert, mit Rinde
HS2	TV, Flex	**HS2** -> F2-7 -> B3-6		100 % Kiefer, frisch, ohne Rinde
HS3	NV	**HS3** -> F8 -> B7		

IV.1.2 Beprobung der laufenden Produktion

Um eine größere Datenbasis zur statistischen Auswertung potentiell vorhandener Korrelationen zwischen Produktionsparametern und effektiven Eigenschaften der hergestellten Platten / Matten zu generieren, wurde die Produktion für drei ausgewählte Produkte (B4, B5, B6) kontinuierlich beprobt. Dabei wurden Materialparameter gemäß Tabelle 4 ermittelt.

Tabelle 4 Parameterumfang der Beprobung

Parameter	**Beschreibung**	**Einheit**
Typ	Platten-/Mattentyp	B4, B5, B6
Seg	Segmente-Typ	A – D
Seg_Use	Laufzeit der Defi Segmente	h
m_fibr	Masse der Fasern	ton/h
T_cook	Temperatur im Kocher	°C
p_cook	Druck im Kocher	Bar
Z_cook	Kochzeit	min
I_defi	Stromaufnahme Defi	Ampere
thick	Dicke der Platte / Matte	mm
rho_tc	Rohdichte Wärmeleitfähigkeit	kg/m^3
tc	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
x=0 … x=8000	Fraktion einer bestimmten Maschenweite (µm) der Siebanalyse	m-%

Aus diesen direkt und messtechnisch ermittelten physikalischen Größen wurden weitere rechnerische Größen abgeleitet.

Errechnet wurde die spezifische Stromaufnahme im Defibrator (I_defi_spez). Diese wird ermittelt als der Quotient aus der Stromaufnahme in Ampere und der Masse an Fasern in ton/h. Da auch innerhalb einer Linie der Massendurchsatz schwankt, ist die spezifische Stromaufnahme repräsentativer für die zum Faseraufschluss benötigte Energie als die absolute Stromaufnahme des Defibrators (I_defi).

$$I_{defi_{spez}} = \frac{I_{defi}}{m_{fibr}} \tag{4}$$

Der Severity Factor (SF) nach Brasch und Free 1965 (zitiert nach Wenderdl 2015) stellt die Umrechnung der Kochzeit (Z_cook) unter Berücksichtigung der Temperatur (T_cook) auf eine äquivalente Kochzeit bei einer bestimmten Bezugstemperatur dar. Der SF beschreibt damit den Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel in Abhängigkeit von Temperatur und Kochzeit. Als Bezugstemperatur wurde 100°C gewählt.

$$SF = Z_{cook} \cdot e^{\left(\frac{T_{cook} - Bezugstemperatur}{14.75}\right)} \tag{5}$$

Im Weiteren wurden die Fraktionen der Siebanalyse (x=0 … x=8000) zu Quantilen zusammengefasst. Die Datenpunkte zwischen den realisierten Siebgrößen wurden dafür abschnittsweise linear interpoliert. Die Quantile der Siebmaschenverteilung QUANT_20, QUANT_50 und QUANT_80 wurden dann aus dieser abschnittsweise definierten Funktion ermittelt.

Die so ermittelten Quantile wurden außerdem zu Distanzmaßen verrechnet. Q_dist_80_20 beschreibt die Distanz zwischen dem Wert des 80 %-Quantils und dem 20 %-Quantil. Die daraus abgeleitete

Größe Q_dist_rel_80_20 stellt dann im Weiteren den Quotienten aus der Spannweite Q_dist_80_20 und dem Median der Siebmaschenverteilung QUANT_50 dar. Der Bezug der Spannweite auf die mittlere Siebmaschenweite gibt ein relatives Maß für die Spannweite ab und kompensiert die vorhandene Kollinearität zwischen Spannweite und mittlerer Fasergröße.

$$Q_{dist_{80-20}} = QUANT_{80} - QUANT_{20} \quad (6)$$

$$Q_{dist_{80-20_{rel}}} = \frac{Q_{dist_{80-20}}}{QUANT_{50}} \quad (7)$$

Tabelle 5 fasst die erweiterten Kenngrößen zusammen.

Tabelle 5 Errechnete Faktoren

Parameter	**Beschreibung**	**Einheit**
I_defi_spez	Spezifische Stromaufnahme des Defibrators	A/(ton h)
SF	Severity Factor	Min
QUANT_20	Quantile der Massenverteilungssumme aus der Siebanalyse	µm
QUANT_50		µm
QUANT_80		µm
Q_dist_80_20	Distanzmaß: Abstand des 80 %- und 20 %-Quantils	µm
Q_dist_rel_80_20	Relatives Distanzmaß	-

Vor der Auswertung wurden die Daten aufbereitet. Entfernt wurden Datensätze bei denen der Parameterumfang Wärmeleitfähigkeit (tc), Rohdichte (rho_tc), Temperatur (T_cook), Druck (p_cook), Kochzeit (Z_cook), spezifische Stromaufnahme (I_defi_spez) und die Siebgrößen unvollständig waren. Datensätze, die mehrfache Messungen der Wärmeleitfähigkeit an einem Produkt der gleichen Charge abbilden, wurden zusammengefasst.

Aus den vorliegenden Proben wurden Proben mit jeweils hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit ausgewählt, an denen weitere Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit und zur Mikrostruktur durchgeführt wurden. Ausgewählt wurden Produkte des Typs B5 und B6 die im Weiteren die Bezeichnung Probe 83 und Probe 84 tragen (Tabelle 6).

Tabelle 6 Probe 83 und Probe 85 zur näheren Untersuchung der Mikrostruktur

Probe	**Typ**	**Dichte**	**Wärmeleitfähigkeit**
-	-	in kg/m³	in mW/(m K)
83	B6	55.2	36.7
85	B5	47.8	39.2

IV.1.3 Industrieversuche

Im Projektverlauf wurden insgesamt vier Industrieversuche durchgeführt.

Erfasst wurden jeweils soweit möglich die Herstellparameter entsprechend Tabelle 4 sowie die daraus abgeleiteten Größen (Tabelle 5). Da nicht auf allen Anlagen alle Parameter ermittelt werden konnten, sind die Datensätze nicht immer vollständig.

Bei dem Industrieversuch I wurde die Wärmeleitfähigkeit an losen Fasern in unterschiedlichen Dichtestufen untersucht. Hierzu wurden die Fasern lose in einen Rahmen eingestreut und mit einem Pressstempel verdichtet. Die Wärmeleitfähigkeit der in den Industrieversuchen II – IV hergestellten flexiblen Matten wurden jeweils entsprechend IV.2.2 untersucht. Teilweise wurde der Strömungswiderstand entsprechend IV.2.6 untersucht.

Bei allen Industrieversuchen wurden Muster der Fasern mit einem optischen Verfahren zur Ermittlung charakteristischer Fasergrößen untersucht (IV.2.11).

IV.1.3.1 Industrieversuch I

In einem ersten Industrieversuch wurden lose Fasern produziert. Dabei wurden die Aufschlussbedingungen systematisch variiert.

Die Kochzeit wurde in drei Schritten von 2, 3 und 5 min variiert. Druck und Temperatur sind physikalisch voneinander abhängig und wurden ebenfalls in drei Kombinationen (145°C / 4,5 bar; 160°C / 6,5 bar und 180°C / 9,0 bar) eingestellt. Von den damit insgesamt 9 Kombinationsmöglichkeiten wurden 6 Varianten untersucht. Tabelle 7 zeigt die Bezeichnung der Faservarianten und die erreichten Aufschlussbedingungen.

Tabelle 7 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs I

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr
-	in °C	in bar	in min	in min	ton/h
LLF15	157	6.3	3	148	3
LLF16	157	6.3	4	197	3
LLF17	157	6.3	5	247	3
LLF18	167	9.5	3	291	3
LLF19	167	9.5	5	486	3
LLF20	147	4.8	3	75	3

IV.1.3.2 Industrieversuch II

Basierend auf den erzielten Ergebnissen wurde ein zweiter Industrieversuch durchgeführt, bei dem nun Matten mit unterschiedlich aufgeschlossenen Fasern und zwei Zieldichten (50 kg/m^3, 60 kg/m^3) hergestellt wurden. Tabelle 8 zeigt die Bezeichnung der Faservarianten und die erreichten Aufschlussbedingungen.

Tabelle 8 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs II (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr
-	in °C	in bar	in min	in min	ton/h
LLF21	149	4.6	3.2	89	2.5
LLF22	158	6.1	3.2	163	2.5
LLF23	171	9.1	3.2	394	2.5

IV.1.3.3 Industrieversuch III

In einem dritten Industrieversuch war ein gegenüber der Aufschlussvariante F23 nochmal verschärfter Aufschluss mit einem Severity Factor von 800 min (z. B. T_cook 170°C, Z_cook 7 min) geplant. Gleichzeitig sollte versucht werden das Dichteprofil der Matten durch eine Variation der Bandgeschwindigkeit zu variieren. Die unterschiedliche Bandgeschwindigkeit führt bei einem fest eingestellten Winkel der Vorpresse zu einer unterschiedlich schnellen Komprimierung. Eine langsamere Bandgeschwindigkeit sollte demnach zu einem weniger steil ausgeprägten Dichteprofil, eine schnellere Bandgeschwindigkeit zu einem stärker ausgeprägten Dichteprofil führen.

Aufgrund von Beschränkungen in der Bereitstellung des benötigten Heißdampfes gelang es nicht die geplante hohe Temperatur von 170°C zu erreichen. Auch die Kochzeit konnte nicht wie geplant eingehalten werden. Bei Faser F24 wurde ein „weiter Mahlspalt“ eingestellt. Bei Faser F25 ein „enger Mahlspalt. Aus der Variante F24 wurden Matten mit einer Dichte von ca. 50 kg/m^3 und einer Bandlaufgeschwindigkeit von 4 m/min und 7 m/min hergestellt. Aus der Variante F25 wurden Matten mit einer Dichte von ca. 60 kg/m^3 und einer Bandlaufgeschwindigkeit von 4 m/min und 7 m/min hergestellt. Tabelle 9 zeigt die Bezeichnung der Faservarianten und die erreichten Aufschlussbedingungen.

Tabelle 9 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr
-	in °C	in bar	in min	in min	ton/h
LLF24	165	6.3	3.2	262	3.1
LLF25	165	6.4	3.2	262	3.1

IV.1.3.4 Industrieversuch IV

In einem abschließenden Industrieversuch wurde nochmal versucht einen deutlich differenzierten Severity Factor zu erreichen. Da die Temperatur wieder auf 155°C begrenzt war, wurde die Kochzeit auf 15.4 min verlängert. Damit wurde ein Severity Factor von 611 min erreicht (Tabelle 10).

Tabelle 10 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten) mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr
-	in °C	in bar	in min	in min	ton/h
LLF26	154	6.6	15.4	611	1.5

IV.2 Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Methoden beschrieben. Dabei werden sowohl Standardmethoden als auch neu entwickelte Verfahren sowie spezifische Versuchsaufbauten beschrieben.

IV.2.1 Probenzuschnitt und Lagerung

Das Material lag im Wesentlichen in den Abmessungen von ca. 1250 x 625 x Dicke [mm] vor. Um eine dokumentierte und ggf. auch reproduzierbare Entnahme der untersuchten Probekörper zu erhalten wurde vorab ein Zuschnittplan (Abbildung 10) festgelegt. Die Probekörper wurden entsprechend entnommen und anschließend im Klima 23°C / 50 % r. F. gelagert. Vor Durchführung der jeweiligen Prüfungen erfolgten ggf. weitere spezifische Vorbehandlungen – so wurden die Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bspw. an getrockneten Proben vorgenommen.

Insgesamt lag für jede Variante folgender Untersuchungsumfang vor, der aus jeweils insgesamt 4 Platten entnommen wurde:

Tabelle 11 Probenumfang (initiale Beprobung)

Prüfung	Dimension in mm	Anzahl
Wärmeleitfähigkeit	500 x 500 x Dicke	2
Verhalten bei Druckbeanspruchung	200 x 200 x Dicke	6
Strömungswiderstand	100 x 100 x Dicke	5
Reindichte	Reststreifen	-
Sorption	Reststreifen	-
µ-CT / Synchrotron	300 x 200 x Dicke	4

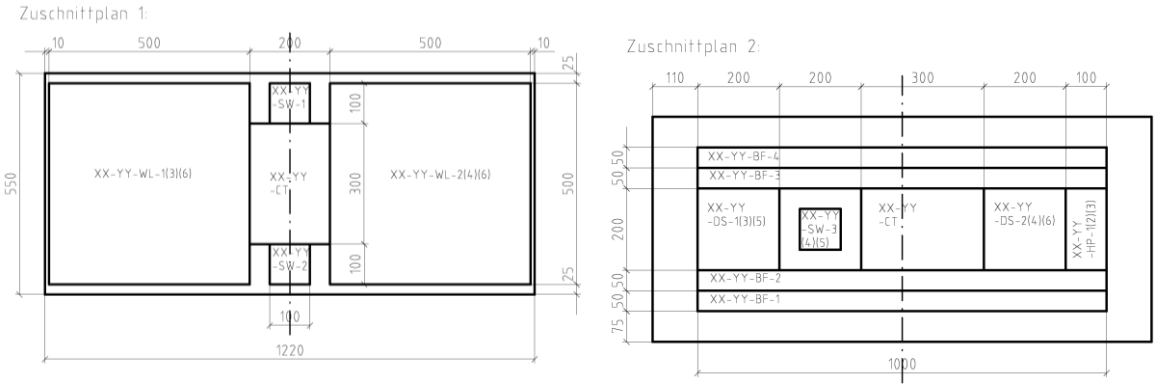


Abbildung 10 Zuschnittplan und Verteilung der Proben, WL = Wärmeleitfähigkeit, DS = Druckspannung, SW = Strömungswiderstand, HP = Helium-Pyknometer, CT = µCT

IV.2.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (EN 12667)

Die Wärmeleitfähigkeit wurde im Laufe des Projekts mit unterschiedlichen Verfahren bestimmt.

Zum Einsatz kam ein Zweiplattenverfahren nach EN 12667 mit dem die Wärmeleitfähigkeit bei Probenmitteltemperaturen von 10°C – 50°C und einer Temperaturdifferenz von 15 K bestimmt wurde. Der Bezug auf 10°C Probenmitteltemperatur erfolgt durch die Anwendung einer Regression im

ermittelten Wertebereich. Das Verfahren ist absolut betrachtet genauer, als das ebenfalls angewendete Messplattenverfahren. Das Zweiplattenverfahren wurde für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der initialen Beprobung und der abschließenden Varianten der Optimierungsschleife bei den Industrieversuchen verwendet.

Für Reihenuntersuchungen im Projektverlauf wurde außerdem ein Messplattenverfahren nach EN 12667 genutzt. Die Temperaturdifferenz betrug auch hier 15 K. Durch die Verwendung eines Messplattenverfahrens mit einer geregelten Kühl- und Heizplatte, kann eine sehr exakte Probenmitteltemperatur eingestellt werden. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei 10°C Probenmitteltemperatur gelingt damit als 1-Punkt Messung.

Ebenfalls im Messplattenverfahren wurde die Wärmeleitfähigkeit an losen Faserstoffen bestimmt. Um eine kontrollierte Zieldichte bezogen auf absolut trockenes Material zu erreichen, wurde zunächst an dem bei Raumklima klimatisierten Material eine Feuchtebestimmung durchgeführt. Aus dem ermittelten Feuchtegehalt und der Zieldichte bezogen auf absolut trockene Bedingungen wurde die benötigte Masse im klimatisierten Zustand abgewogen. Das Material wurde anschließend getrocknet und im noch heißen Zustand in einen XPS Rahmen mit einer Dicke von 40 mm überhöht (Aufsatzrahmen) eingestreut. Mit Hilfe eines Presstempels wurde das Material auf die Zieldicke von 40 mm verdichtet. Der Abschluss der Probe erfolgte mit einer PE-Folie mit aufgebrachten Thermoelementen. Die Wärmeleitfähigkeit wurde anschließend bei 15 K Temperaturdifferenz und 10°C Probenmitteltemperatur bestimmt.

Für alle Verfahren wurde das Material vor der Messung in einem Frischluft-/Abluft Trockenschrank unter Verwendung vorgetrockneter Luft bei 70°C getrocknet. Nach dem Trocknen wurde das Material in Folie eingepackt und bis zur Messung in einem Großexsikkator über Trockenmittel gelagert. Die durch Rückwiegung ermittelten Feuchtegehalte lagen nach der Messung in einem Bereich von 0.1 – 0.6 m-%, im Mittel bei 0.3 m-%.

IV.2.3 Bestimmung der Anteile der Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung basiert im Wesentlichen auf den Wärmeübertragungsmechanismen Leitung, Strahlung und Konvektion. Für die in Holzfaserdämmstoffen vorliegenden Dichten und die zugeordneten Strömungswiderstände ist der Konvektionsanteil so gering, dass dieser praktisch vernachlässigt werden kann. Relevant ist jedoch der Anteil der Wärmestrahlung an der Wärmeübertragung.

Um zu überprüfen in welcher Größenordnung und ggf. produktspezifisch die Wärmestrahlung in den Modellen zur Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden muss, wurde ein physikalischer Versuch zur Bestimmung der Wärmeübertragungsanteile für die Plattenvarianten B4 und B7 durchgeführt. Die Wahl der Varianten deckt damit eine im Trockenverfahren und eine im Nassverfahren hergestellte Holzfaserdämmstoffplatte ab. Da die Übertragung von Wärmestrahlung zwischen den Partikeln des Fasernetzwerkes vom Emissionsgrad der Oberflächen der Fasern abhängt, soll untersucht werden ob die mit Klebstoff überzogenen Fasern der Variante aus dem Trockenverfahren gegenüber der weitgehend auf mechanischer Verfilzung basierenden Bindung der

Variante aus dem Nassverfahren Unterschiede zeigen. Auch unterscheidet sich bereits optisch die Faser der beiden Varianten. Die Fasern aus dem Nassverfahren sind deutlich dunkler, was einerseits auf die Rindenanteile, andererseits aber auch auf unterschiedliche Aufschlussbedingungen und evtl. geringe Anteile von Hydrophobierungsmitteln und Phenolharz in der Nassverfahrensvariante zurückgeführt werden kann.

Für die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung wurde ein Zweiplattengerät nach DIN EN 12667 mit einer Messunsicherheit < 2 % genutzt. Die Holzfaserdämmstoffe wurden nach einer Ofentrocknung bei 103°C noch heiß in eine vakuumdichte Folienumhüllung eingebracht an die ein Adapter angeflanscht werden kann. Nach der Versiegelung der Folienumhüllung wurde das Panel mit einer Turbomolekularpumpe auf einen Innendruck von ca. 0,03 mbar evakuiert. Bei diesem Druck und Umgebungstemperaturen von 20°C ist die freie Weglänge der Gasmoleküle > 2 mm, was auf jeden Fall deutlich über den mittleren Porendurchmessern in den untersuchten Holzfaserdämmstoffen liegt. Auf diese Weise wird die Gaswärmeleitfähigkeit durch den sogenannten Knudsen Effekt unterdrückt. Abbildung 11 zeigt eine Prinzipskizze zum Messaufbau.

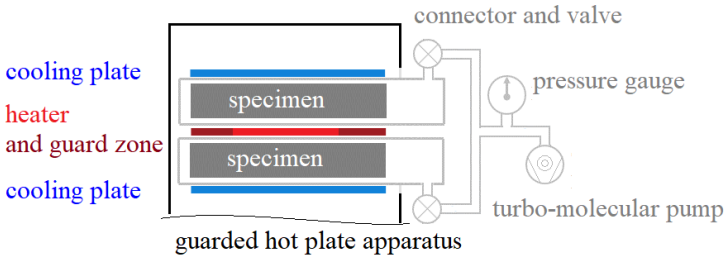


Abbildung 11 Prinzipskizze zum Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeübertragungsmechanismen in Holzfaserdämmstoffe

Anschließend wurde die Wärmeleitfähigkeit in einem breiten Temperaturbereich von -50°C – 40°C gemessen. Abbildung 12 zeigt das Holzfaserpanel mit vakuumdichter Folienumhüllung und den angeflanschten Adapater sowie die zwei Paneele im eingebauten Zustand. Nach Abschluss der Messung wurde der Versuch im belüfteten Zustand wiederholt.

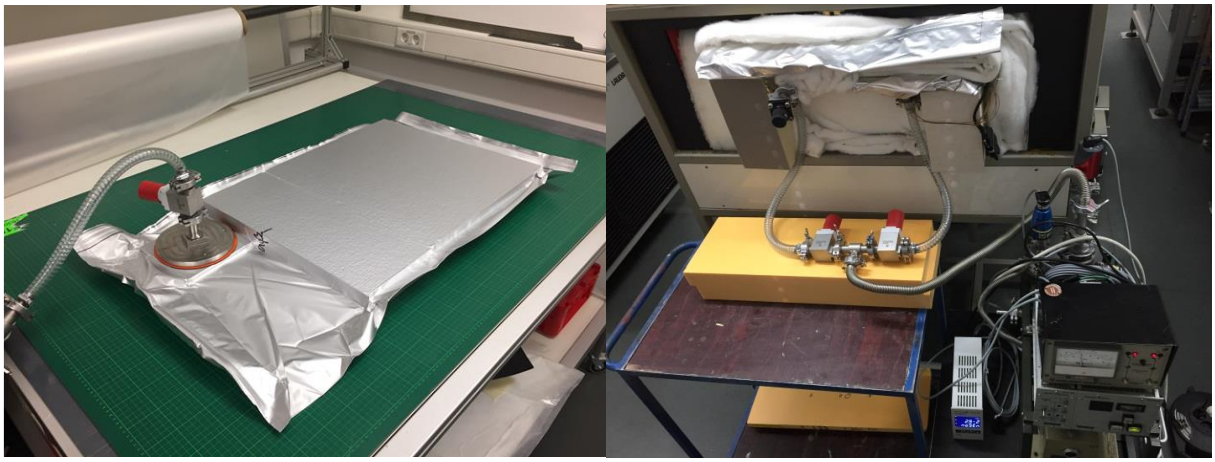


Abbildung 12 Holzfaserpanel mit vakuumdichter Folienumhüllung und angeflanschtem Adapter (Links); Proben eingebaut im Zweiplattenmessgerät mit Turbomolekularpumpe und Drucksensor (Rechts)

Zur Auswertung wird für die Wärmeleitfähigkeit des Festkörpers eine konstante Wärmeleitfähigkeit angenommen. Die effektive Wärmeleitfähigkeit des evakuierten Probekörpers bei unterschiedlichen Temperaturen kann dann auf die Funktion $\lambda_{evac}(T) = \lambda_{r+s}(T) = k_{rad} \cdot T^3 + \lambda_s$ gefittet werden. Der Unterschied zur Wärmeleitfähigkeit der Probe unter Normaldruck $\lambda_{atm} - \lambda_{evac}$ erklärt dann die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion des Zellgases sowie die Kopplungseffekte. Dieser Term kann mit guter Näherung durch den Zusammenhang $\lambda_{g+c} = AT^2 + BT$ ausgedrückt werden.

IV.2.4 Bestimmung des Emissionsgrades

Durch die Bestimmung des Emissionsgrades von Dämmstoffschichten auf unterschiedlich reflektierenden, bzw. absorbierenden Untergründen sollte geklärt werden ob ggf. eine Transmission von Wärmestrahlung in bestimmte Schichttiefen stattfindet.

Dazu wurden die Produkte Flex (B5/B6) und Therm (B4) in unterschiedlich dicke Schichtstärken aufgetrennt. Um ggf. Unterschiede zwischen einer Struktur aus der Mittelschicht und dem Randbereich der Probe zu ermitteln, wurde die dünnste Schichtstärke (3 mm) jeweils einmal vom Rand und aus der Mitte der Dämmstoffprobe entnommen. Weitere Schichtstärken waren 5 mm, 10 mm und 15 mm. Als Referenz wurde jeweils der Emissionsgrad der blanken Oberflächen (schwarz lackierte Metallplatte, Aluminiumfolie auf Metallplatte) sowie der Emissionsgrad des Dämmstoffs in voller Stärke (80 – 100 mm) ohne Hinterlegung gemessen.

Das Messgerät (TIR 100) besteht aus einem sphärischen Halbraum, der auf eine Temperatur von 100°C geheizt ist. Die zu messende Oberfläche wird für kurze Zeit der emittierenden Wärmestrahlung des Messgeräts ausgesetzt und die von der Oberfläche des Probekörpers reflektierte Strahlung gemessen. Der Emissionsgrad wird aus dem Vergleich mit Reflexionswerten der Probe mit gespeicherten Referenzwerten zweier kalibrierter Standards ermittelt. (Abbildung 13)

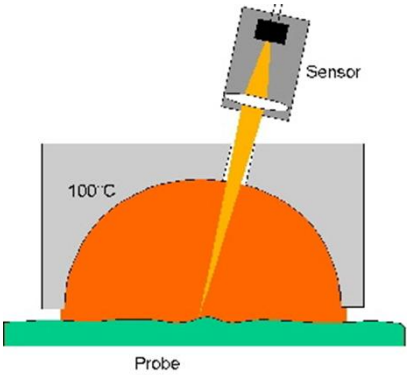


Abbildung 13 Messprinzip TIR 100 (Quelle: https://www.tir100.de/index.html)

IV.2.5 Verhalten bei Druckbeanspruchung (EN 826)

Das Verhalten bei Druckbeanspruchung wurde nach DIN EN 826 bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde nach EN 826 in Abhängigkeit der Probendicke auf eine Geschwindigkeit von 0.1 x d in mm/min eingestellt, wobei d die Probendicke in mm bezeichnet. Dementsprechend ergeben sich für alle Proben unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten. Die verwendeten Probenmaße betrugen 200 x 200 x Dicke [mm].

Die Vorlast zur Bestimmung der Ausgangsdicke d_0 als Verformungsnullpunkt für die Bestimmung der Stauchung ε_m wurde auf 250 Pa festgelegt. Ermittelt wurde die Druckspannung bei 10 % Stauchung in kPa und das E-modul in kPa.

IV.2.6 Bestimmung des Strömungswiderstands (EN 29053)

Der Strömungswiderstand wurde 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. Der auf eine Strömungsgeschwindigkeit von 0.5 x 10^{-3} m/s bezogene Strömungswiderstand r in (Pa s)/m^2 wird aus den bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten ermittelten Messwerten extrapoliert. Die verwendeten Proben wurden kreisförmig mit einem Durchmesser von 100 mm zugeschnitten und mit einer leichten Presspassung im Messplatz installiert.

IV.2.7 Bestimmung der Reindichte (Helium-Pyknometer)

Die Bestimmung des Feststoffvolumens der in einem Teilvolumina befindlichen Probe, erfolgt aus den gemessenen Druckveränderungen durch eine isotherme Gasexpansion einer konstanten Messgasmenge in einem Gaspyknometer mit zwei kalibrierten Teilvolumina, die über ein Absperrventil miteinander verbunden sind. Die Feststoffmasse ist durch Wägung zu bestimmen. Die Feststoffdichte berechnet sich aus dem Verhältnis von Feststoffmasse zu Feststoffvolumen. Eine Kurzbeschreibung des Verfahrens findet sich in der DIN 66173-2:12-2004 Abschnitt 4.

Es muss eine für den zu prüfenden Stoff repräsentative, getrocknete Probe ausgewählt werden, wobei die jeweilige Messkammer möglichst gut ausgefüllt werden sollte. Die trockene Probe wird in die Messkammer eingebaut und mit Messgas gespült, um die eingebrachte Luft durch das Messgas zu ersetzen. Dies kann im kontinuierlichen Gasstrom oder durch pulsartiges Spülen erfolgen. Die Dauer der Spülung bzw. Anzahl der Spülzyklen hängt von der Feinteiligkeit und Feinporigkeit der Probe ab. Als Messgas wird Helium 5.3 verwendet.

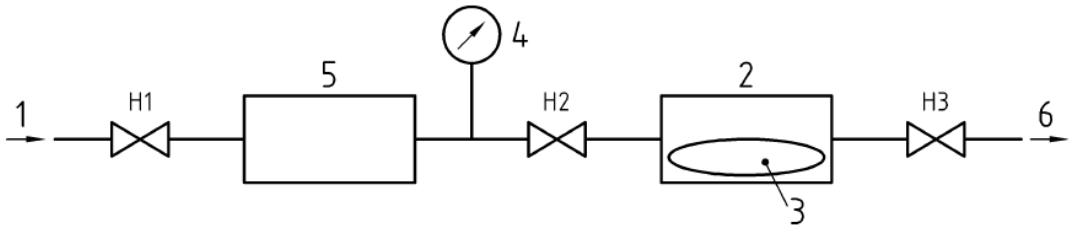
Die Massebestimmung der Probe erfolgt mit einer Analysenwaage. Die Genauigkeit der Einwaage darf nicht schlechter als 10^{-3} Prozent sein.

Abbildung 14 zeigt eine Prinzipskizze des Prüfaufbaus.

Zu Beginn der Messung erfolgt durch Öffnen der Ventile H2 und H3 zunächst ein Druckausgleich zwischen den bereits mit Messgas gespülten Teilvolumina und der äußeren Atmosphäre. Mit Hilfe des Drucksensors wird der zum Zeitpunkt der Messung herrschende Atmosphärendruck berücksichtigt (Nullung des Drucksensors). Vor Beginn der eigentlichen Messung werden die Ventile H2 und H3 wieder geschlossen. Am Ventil H1 ist das Messgas Helium 5.3 mit einem Druck von 1,5 bis 2,0 bar angeschlossen.

Durch Öffnen von Ventil H1 wird das Messgas in das Zusatzvolumen (Referenzvolumen) geleitet. Nach Erreichen des Messdruckes p_A wird H1 wieder geschlossen. Danach wird das Ventil H2 geöffnet und es erfolgt die Expansion des Messgases in die unter Atmosphärendruck stehende Messkammer mit der Probe, wodurch ein Druckabfall bewirkt wird. Das Ablesen bzw. Aufnehmen des Druckwertes

p_E erfolgt nach dem Einstellen des Gleichgewichtes, d. h. bei Druckkonstanz. Das Kriterium für die Druckkonstanz (maximale Druckänderung pro Zeiteinheit) muss vor der Analyse definiert werden. Am Ende des Messzyklus wird das Mess-System durch Öffnen von H2 und H3 wieder auf Umgebungsdruck gebracht. Die Messzyklen werden solange wiederholt, bis die Messwerte konstant sind, d. h. die voreingestellte Standardabweichung erreicht wird oder die voreingestellte Anzahl der Messzyklen abgearbeitet sind. Im Anschluss kann die Messkammer geöffnet und die Probe entnommen werden.



Legende

1 Gaseinlass
2 Messkammer V_K
3 Probe V_F
4 Drucksensor
5 Zusatzvolumen V_Z
6 Gasauslass

Abbildung 14 Prüfaufbau zur Bestimmung der Reindichte (Prinzipskizze)

Das zur Ermittlung der Feststoffdichte benötigte Volumen V_F wird aus den gemessenen Druckwerten p_A und p_E sowie aus den Werten der kalibrierten Volumina V_k der Probenkammer und V_z des Zusatzvolumens berechnet:

$$V_F = V_k - \left(\frac{p_A - p_E}{p_E}\right) \cdot V_z \quad (8)$$

Die Feststoffdichte ρ_F ist der Quotient aus der Feststoffmasse m_F und dem gaspyknometrisch ermittelten Volumenwert V_F:

$$\rho_F = \frac{m_F}{V_F} \quad (9)$$

IV.2.8 Bestimmung des Sorptionsverhaltens

Das Sorptionsverhalten wurde mit einer Sorptionsmessanlage der Fa. proUmid bei 23°C im Bereich der relativen Luftfeuchte von 0 – 98 % r. F. ermittelt. Vor der eigentlichen Messung wurden die Proben im Gerät mit einer pre-heat Phase bei 60°C bis zur Massenkonstanz getrocknet, um einen möglichst absolut trockenen Bezugswert der Masse zu erreichen. Die Adsorptionsisotherme wurde im Bereich von 0 – 90 % r. F. in Schritten von 10 % r. F. durchfahren, anschließend auf 98 % r. F. aufgefeuchtet und in gleichen Schrittweiten die Desoptionsisotherme aufgenommen. Die Zeitdauer zwischen den Massenbestimmungen betrug 10 min und das Massenkonstanzkriterium wurde auf 0,005 m-%/60 min festgelegt.

Aus den dünneren Plattenmaterialien (B1, B2, B7) wurden Proben aus verschiedenen Platten entnommen. Die dickeren Varianten B3, B4, B5, B6 wurden jeweils an unterschiedlichen Stellen über der Plattendicke beprobt (Oben, Mitte, Unten). Die Probengröße betrug jeweils ca. 1 cm^3. In einem Vorversuch wurde geprüft ob die kleinen Proben gegenüber größeren Probequerschnitten repräsentative Werte ergeben – was jeweils gegeben war.

Abbildung 15 Sorptionsmessanlage mit Probekörpern

IV.2.9 Herstellung von flexibel gebundenen Platten in einem Laborprozess

Um bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit Variationen durch Einflüsse der händisch und lose eingestreuten Proben zu vermeiden, wurde ein Laborprozess entwickelt, mit dem flexibel gebundene Matten im Labor hergestellt werden können, deren Struktur einerseits reproduzierbarer und andererseits näher am Industrieprodukt ist, als die lose eingestreuten Proben.

Hierfür musste zunächst ein geeigneter Mischprozess für die Mischung zwischen Holz- und Bicofaser sowie ein Apparat zur homogenen Streuung der Fasermatten entwickelt werden. Der Prozess zur Mattenherstellung ist wie folgt:

- Faserfeuchte bestimmen – Anteile Faser / Bico (5 m-%)
- Mischung durch pneumatische Förderung mit „Laubsauger“
- Abstreuen in Streukasten bis Masse erreicht
- Egalisieren der Oberfläche
- Vorverdichten
- Aktivierung Bico im Ofen bei 140°C
- Abkühlen – Wiegen – in Folie verpacken
- Wärmeleitfähigkeit bestimmen

Die Mischung von Holz- und Bicofaser erfolgt durch eine intensive pneumatische Verwirbelung. Nach einer „Vormischung“ der massenanteilig (Feuchtebezug beachten) eingewogenen Komponenten von Hand, wird das Material insgesamt drei Mal mit einem Laubsauger, an den ein ca. 3 m langer

Absaugschlauch mit DN100 angeschlossen ist, gefördert. Dabei wird das Material durch den Ansaugstutzen zunächst durch den im Laubsauger angeordneten Ventilator vermischt und anschließend auch durch die Reibung und turbulente Strömung im Absaugschlauch.

Abbildung 16 Vorbereiten der Mischung zwischen Holzfaser (braun) und Bico (weiß), rechts: Mischung durch pneumatische Verwirbelung

Abbildung 17 Mischung zwischen Holzfaser und Bico nach einmaligem Durchlauf – vereinzelte Agglomerate der Bico-Fasern zu erkennen

Um zu überprüfen inwieweit der mehrfache Durchlauf im Laubsauger eine Schädigung der Faserstruktur bewirkt wurden Fasermuster der Variante LLF16 im Frischzustand, nach einmaligem und dreimaligem Durchlauf mittels 2D-Scanner charakterisiert (Abbildung 18).

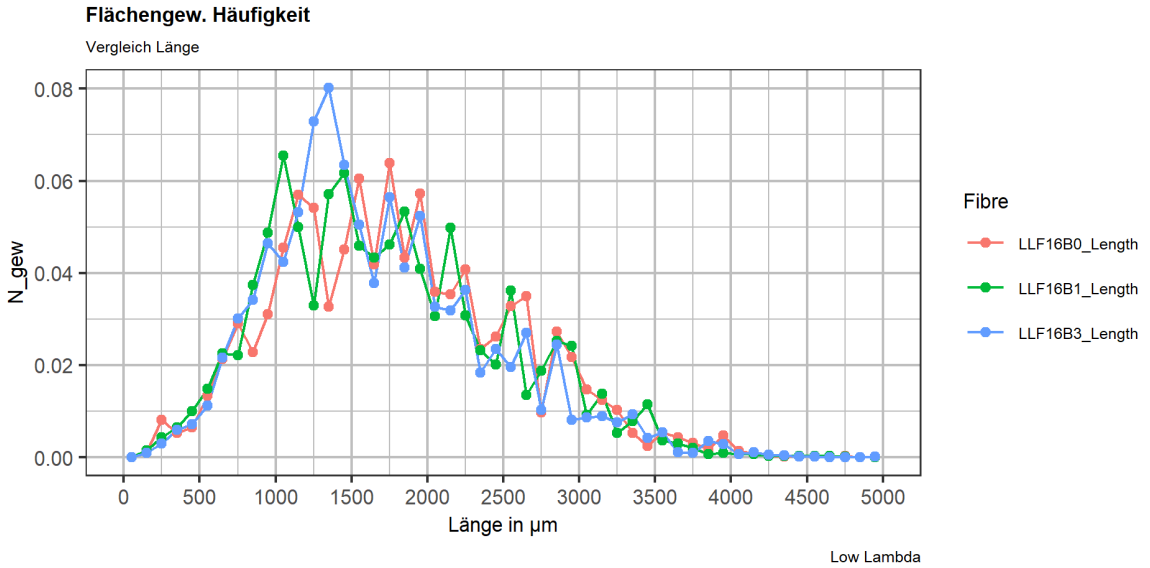


Abbildung 18 Geodätische Längen des Fasermusters LLF16 im Frischzustand (LLF16B0), nach einmaligem (LLF16B1) und dreimaligem (LLF16B3) Durchlauf im Mischer (Auswertung B)

Ein Vergleich der Längenverteilungen zeigt keine grundlegende Verschiebung der Charakteristik, weshalb davon ausgegangen wird, dass die Faserlängen und -breiten in der hergestellten Laborprobe repräsentativ für die erzeugten Kollektive sind.

Nach der Mischung wird das Gemisch mit einer im Projekt aufgebauten Laborstreueinrichtung abgestreut. Dabei wurde zunächst mit unterschiedlichen Anordnungen von bis zu vier Streuwalzen experimentiert, mit dem Ziel einen über die Fläche des Streukastens gleichmäßigen Faseraustrag zu erzielen. Nach einer Reihe von Vorversuchen hat sich jedoch die Verwendung einer einzelnen Streuwalze, die einen eher linienförmigen Faseraustrag hat, als am zielführendsten herausgestellt. Um den Streukasten gleichmäßig zu befüllen, traversiert dieser angetrieben von einem Druckluftzylinder gleichmäßig unter dem linienförmigen Faservorhang hin und her. Eine gleichmäßige Zuführung der aufgegebenen Fasern an die Streuwalze wird über eine pneumatisch angeregte Rüttelplatte erzielt.

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Laborstreueinrichtung sowie den Streukasten vor und nach der Befüllung. Die zur Herstellung der Zielrohdichte benötigte Menge an Fasern wird durch wiederholte Wiegung bestimmt. Hierzu kann der Streuwagen einfach entnommen und gewogen werden.

Abbildung 19 Laborstreueinrichtung zur Herstellung flexibel gebundener Dämmstoffmatten, Links: Gesamtansicht; Rechts: Streuwalze und Zuführrinne

Abbildung 20 Laborstreueinrichtung zur Herstellung flexibel gebundener Dämmstoffmatten, pneumatisch angetriebener traversierenderStreuwagen

Wenn die benötigte Menge an Fasern eingestreut ist, wird die Höhe des Faserkuchens ggf. durch vorsichtiges herauszupfen und verteilen von Fasern egalisiert. Durch die gleichmäßige Einstreuung ist dies jedoch nur in sehr begrenztem Umfang notwendig. Anschließend wird der Faserkuchen von Hand auf die Nenndicke von 40 mm verdichtet und der obere Aufsatz des Streukastens abgenommen.

Die Fasermatte wird dann mit einem Lochblech nach oben abgeschlossen. Damit keine Fasern an den Blechen haften bleiben, sind diese mit einem Trennmittel imprägniert. Der geschlossene Streukasten wird anschließend in einem Frischluft-Abluft-Trockenschrank bei 140°C erhitzt um die Bico-Fasern zu

aktivieren. Die Zeit im Trockenschrank wird so eingestellt, dass im Inneren der Matte mindestens 130°C erreicht werden.

Anschließend wird die Form aus dem Trockenschrank entnommen. Nach einer kurzen Abkühlphase wird die gebundene Fasermatte entformt und in einem Großexsikkator, der permanent mit absolut trockener Luft gespült ist, weiter abgekühlt.

Abbildung 23 zeigt eine fertige Laborflex Matte mit den Maßen 400 x 400 x 40 mm. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird die Probe direkt aus dem Großexsikkator entnommen, die Masse bestimmt und anschließend in dünne PE Folie gepackt um eine Auffeuchtung während dem Handling und der Messung zu verhindern.

Abbildung 21 Vorverdichten des Faserkuchens

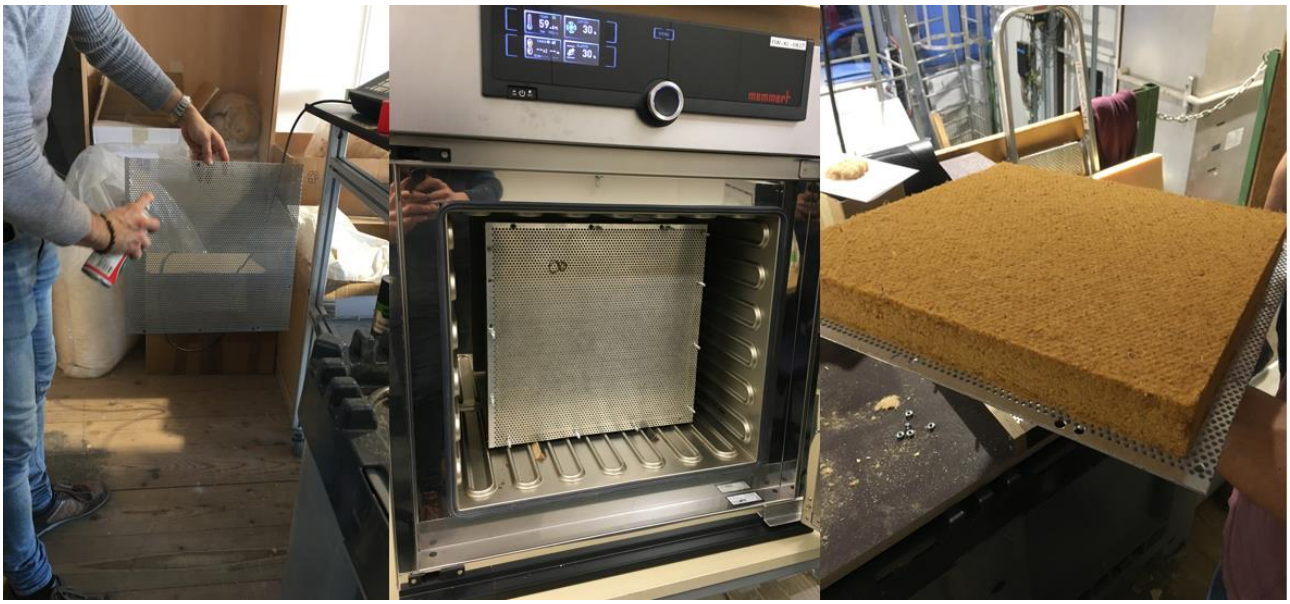


Abbildung 22 Imprägnierung der Bleche mit Trennmittel, Aktivierung der Bico-Faser bei 140°C im Trockenschrank

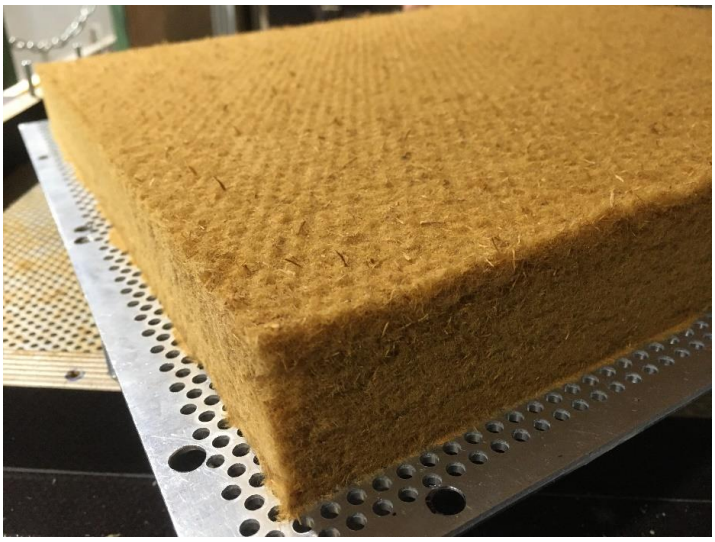


Abbildung 23 Fertige Labor-Flex Matte mit den Maßen 400 x 400 x 40 mm

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden Proben aus den Fasern des Industrieversuchs mit den Herstellparametern entsprechend Tabelle 7 hergestellt.

IV.2.10 Durchführung von Siebanalysen

Zur morphologischen Charakterisierung wurden auch Verfahren der Siebanalyse eingesetzt.

IV.2.10.1 Faserstoff

Der Faserstoff wurde durch Siebanalysen fraktioniert. Zum Einsatz kam eine Siebanalysemaschine mit einer Siebgröße von 200 mm. Um eine Vereinzelung der Fasern auf dem Aufgabesieb zu erreichen, wurden würfelförmige Siebhilfen (Gummiwürfel) zugegeben. Die Fraktionierung erfolgte mit den Siebgrößen entsprechend Tabelle 12.

Tabelle 12 Siebmaschenweiten zur Ermittlung der Siebkennlinie von Faserstoffen

Bezeichnung	Siebmaschenweiten in µm
0	0 < x < 125
125	125 < x < 250
250	250 < x < 500
500	500 < x < 1000
1000	1000 < x < 2000
2000	2000 < x < 4000
4000	4000 < x < 8000
8000	8000 < x < ∞

Die Massenanteile in den Fraktionen wurden zu einfacheren Kenngrößen zusammengefasst, die trotzdem eine Aussage über die Verteilung der Korngrößen ermöglichen sollten. Zu diesem Zweck wurden Quantile der Verteilung gebildet. Als für die weitere Auswertung am zielführendsten wurde das 20 %-Quantil, das 50 %-Quantil und das 80 %-Quantil definiert. Zudem wurde der Abstand zwischen

dem 80 %-Quantil und dem 20 %-Quantil sowie das relative Abstandsmaß zwischen diesen Quantilen (bezogen auf das 50 %-Quantil) berechnet. (IV.1.2)

IV.2.10.2 Hackschnitzel

Die Siebung der Hackschnitzel erfolgte auf einer Vibrationssiebmaschine, Typ VibSpeed der Fa. J. Engelsmann AG. Die Siebmaschenweiten wurden im Rahmen der Möglichkeiten vorhandener Siebe gewählt, um eine möglichst gleichmäßige Aufteilung der Hackschnitzel auf die Siebfraktionen zu erhalten (Tabelle 13).

Tabelle 13 Siebmaschenweiten zur Ermittlung der Siebkennlinie von Hackschnitzeln

Bezeichnung	**Siebmaschenweiten in µm**
0	0 < x < 3
3	3 < x < 7
7	7 < x < 13
13	13 < x < 45
45	45 < x < ∞

IV.2.11 Optisches Verfahren zur Ermittlung charakteristischer Fasergrößen

Die erzeugten Faserstoffe wurden außerdem mit Hilfe eines optischen Verfahrens untersucht. Dabei wurden die Partikel auf einen Flachbettscanner abgestreut und mit einer Auflösung von 1200 dpi gescannt. Das verwendete System vom Typ FibreShape der IST AG wertet die Bilddaten automatisiert aus und gibt für alle detektierten Einzelpartikel eine Reihe von charakteristischen Fasergrößen nach ISO 9276 aus. Ausgewertet wurde die geodätische Länge l und -Breite w gewichtet nach der Projektionsfläche.

Die Berechnung von Länge und Breite zeigt Formel (10) und Formel (11). A bezeichnet die Projektionsfläche, P bezeichnet den Umfang des Partikels.

$$l = \frac{-\frac{-P}{2} - \sqrt{\frac{P^2}{4} - 4\,A}}{2} \tag{10}$$

$$w = \frac{-\frac{-P}{2} + \sqrt{\frac{P^2}{4} - 4\,A}}{2} \tag{11}$$

Diskutiert werden die Perzentile der Fasergrößen in µm, insbesondere der Median der Fasergrößen in µm. Dabei werden nur Partikel ab einer geodätischen Länge und Breite > 100 µm berücksichtigt.

Die Durchführung der Messung und die Auswertung der Perzentile wurden im Unterauftrag am WKI Braunschweig durchgeführt. Die Auswertung wird im Folgenden als Auswertung A bezeichnet.

Da die Perzentile von Faserlänge und -breite getrennt voneinander keine Aussage über die Größenverhältnisse der Einzelpartikel ermöglichen, wurden die Rohdaten der Messung am FIW München weiter ausgewertet. Dabei wurden nur Partikel mit einem Feret-Durchmesser der Länge und

Breite > 100 µm berücksichtigt. Die geodätische Länge und Breite dieser Teilmenge wurde anschließend in Klassen von 100 µm (geodätische Länge) mal 10 µm (geodätische Breite) sortiert. Die Häufigkeit der Partikel in den Klassen wurde auf die jeweilige Projektionsfläche gewichtet und in Form einer heatmap unter Verwendung der viridis colormap visualisiert. Zusätzlich wurden Visulisierungen der Verteilungen von Länge und Breite erstellt. Die Auswertungen wurden mit RStudio Version 1.2.5019 basierend auf R Version 3.6.2 durchgeführt. Die Auswertung wird im Folgenden als Auswertung B bezeichnet.

Zu der Auswertung B ist anzumerken, dass insbesondere bei den Faserdicken andere Größenordnungen registriert werden als bei der Auswertung A, da die Definition der Teilmenge durch die Anwendung des Kriteriums Feretdurchmesser > 100 µm realisiert wurde und nicht durch die geodätische Länge > 100 µm. Bei einer Auflösung des Scanners von 20 µm ist somit jeder Partikel in der Teilmenge durch mindestens fünf Pixel im Quadrat definiert. Da die geodätische Länge und – Breite einen Rechenwert darstellt, ergeben sich also auch Werte < 100 µm was für Einzelfasern der Holzart Kiefer mit Faserdurchmessern von ca. 10 – 40 µm auch realistisch ist (Abbildung 4).

IV.2.12 Ermittlung von Rohdichteprofilen

An ausgewählten Materialien wurden mit unterschiedlichen Verfahren Rohdichteprofile ermittelt.

Plattenmaterialien mit einer Rohdichte > 100 kg/m^3 konnten mit einem Labor-Dichteprofilmessgerät DENSE-Lab X der Fa. Electronic Wood Systems vermessen werden. Dabei wird die Probe einem Röntgenstrahl ausgesetzt und der Absorptionskoeffizient bestimmt. Das Verfahren funktionierte intentionsgemäß bei den Varianten B1, B2, B3 und B7.

Bei der Variante B4 mit einer Rohdichte von ca. 80 kg/m^3 war der Absorptionskoeffizient zu gering um die Messung unter Standardbedingungen durchzuführen. In diesem Fall wurde eine Kunststoffscheibe mit bekannter und homogener Rohdichte beigelegt und die Werte wurden entsprechend korrigiert. Das Verfahren führte größenordnungsmäßig zwar zu sinnvollen Ergebnissen, es ist jedoch unklar ob die Messbedingungen sich auf die Auflösung des Geräts auswirken.

Bei Proben mit einer sehr niedrigen Rohdichte von ca. 50 – 60 kg/m^3 (Variante B5 und B6) ließen sich auch durch das Beilegen von Hilfsschichten keine sinnvollen Werte ermitteln, so dass ein alternatives Verfahren angewendet wurde. Hierzu wurden die Proben mit einer Bandsäge in dünne Schichte von 10 – 20 mm Dicke aufgetrennt und die einzelnen Schichten wurden ausgewogen und deren Dicke bestimmt. Das Verfahren birgt eine höhere Messunsicherheit, da die Schichten nach dem Auftrennen eine gewisse Relaxation zeigen, was die genaue Dickenbestimmung erschwert. Die Werte wurden anschließend skaliert auf die Nenndicke der untersuchten Probe.

IV.2.13 Tomographische Aufnahmen

IV.2.13.1 Synchrotronstrahlung

IV.2.13.1.1 Probenpräparation

Für die hochauflösenden Aufnahmen am ESRF in Grenoble wurden Proben mit sehr kleinem Querschnitt benötigt. Die Herstellung von Probenquerschnitten mit ca. 5 x 5 mm über die volle Plattendicke ohne die Faserstruktur in der Probe durch den Schneid- und Präparationsvorgang zu beeinflussen, war insbesondere für die flexiblen Matten eine Herausforderung im Projektverlauf.

Beim Auftrennen der flexiblen Matten mit der Bandsäge kann abgeschätzt werden, dass die Probe mindestens umlaufend bis ca. 5 mm in die Probe hinein beeinflusst wird (herausziehen von Fasern, „gebürstete“ Faserstruktur). Durch die umlaufende Bearbeitung der Probenwürfel und mit einem gewissen Sicherheitszuschlag wurde festgelegt, dass Proben mit ca. 20 x 20 mm Querschnitt auf der Bandsäge hergestellt werden können. Zur weiteren Präparation der µ-CT Proben muss die Faserstruktur fixiert werden.

Aus der Mikroskopie sind hierfür unterschiedliche dünnflüssige Harzsysteme bekannt, von denen folgende getestet wurden:

- EP Gießharz - Epoxidharz (Elektronikbedarf)
- Epon – niedrig viskoses Epoxidharz für REM und Mikroskopie
- LR White – niedrig viskoses Acrylharz für REM und Mikroskopie
- EpoFix – niedrig viskoses Epoxidharz für Anwendungen in der Metallographie (Fa. Struers)

Gute Ergebnisse wurden mit EP Gießharz und EpoFix erzielt, wobei darauf zu achten ist, dass der Probencontainer mit dem Harz verträglich sein muss. Zunächst eingesetzte gefräste Polystyrol-Container erwiesen sich gegenüber Epoxidharzen als nicht beständig. Schließlich wurden Kartoncontainer mit einer Aluminiumversiegelung als handhabbare Alternative identifiziert.

Ungünstige Anwendungen ergaben sich mit den Harzsystemen Epon und LR White. Hier ist insbesondere die Verarbeitung in den benötigten Mengen sicherheitskritisch und die Aushärtung unter Sauerstoffabschluss ebenfalls nur sehr aufwendig zu realisieren.

Abbildung 24 zeigt die Probenpräparation beim Einbetten. Da sich nach orientierenden Scans gezeigt hat, dass trotz der niedrig-viskosen Systeme eine gewisse Blasenbildung nicht zu vermeiden war, wurde ein Verfahren zur Einbettung unter Vakuum umgesetzt. Dabei wird die Probe in einem Exsikkator auf einen Innendruck < 100 mbar evakuiert und anschließend das Harz in die evakuierte Probe infiltriert. Die damit erzielten Ergebnisse zeigten eine geringere Blasenbildung als die nicht evakuierten Varianten.

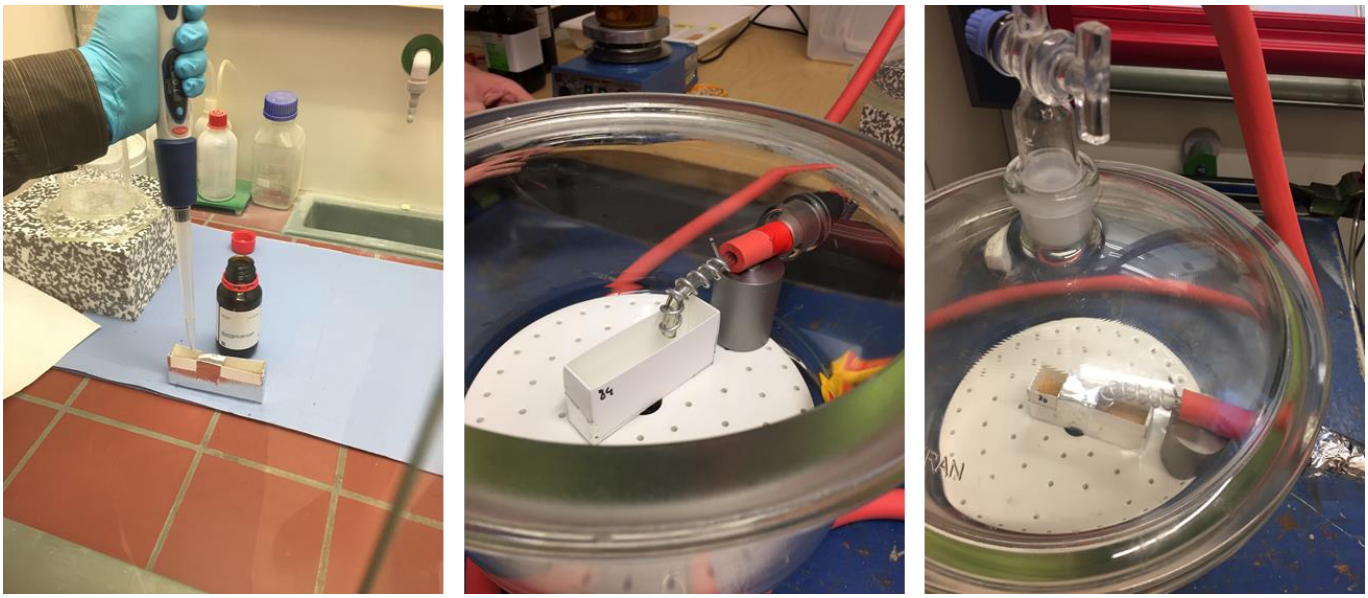


Abbildung 24 Einbettung der Proben in LR White (Links); Versuchsaufbau zur Einbettung der Proben in Epoxidharz EpoFix mit Infiltration unter Vakuum (Mitte, Rechts)

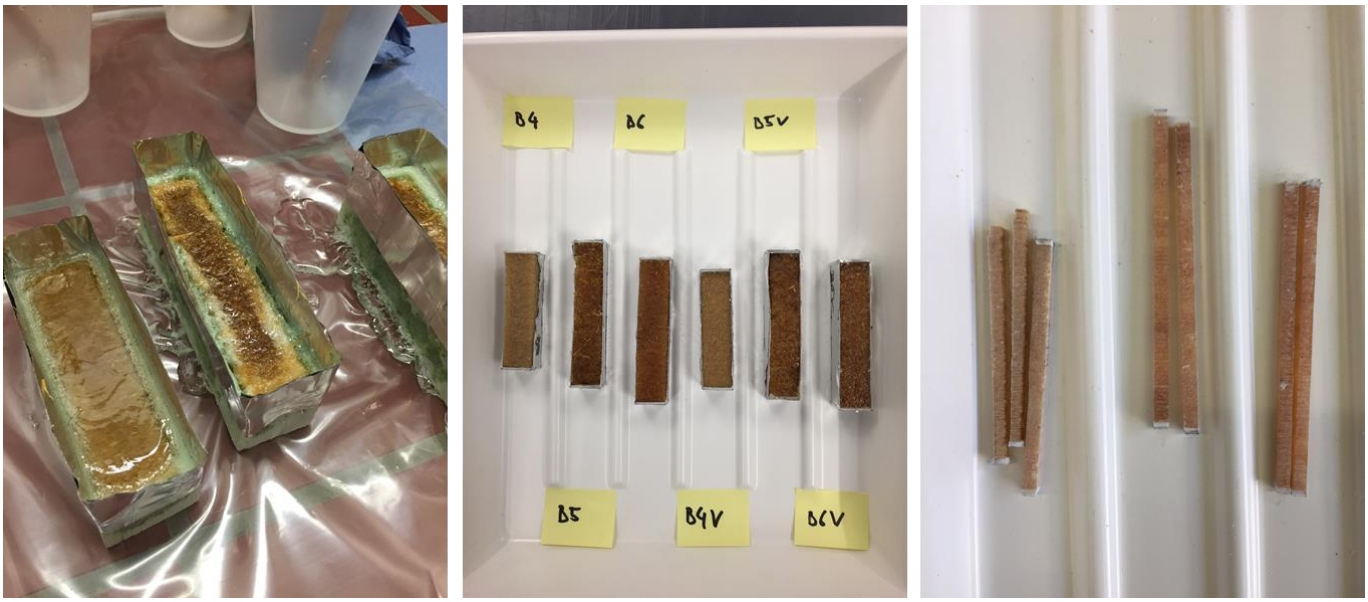


Abbildung 25 In Epoxidharz EpoFix eingebettete Proben (Links, Mitte); Auf Endmaß 5 x 5 mm zugeschnittene Probenwürfel

Abbildung 25 zeigt das Ergebnis der eingebetteten und anschließend auf das Endmaß geschnittenen Probekörper.

Insgesamt war jedoch eine Blasenbildung mit Blasengrößen im Größenbereich der interessierenden Partikel nicht zu verhindern. Gleichzeitig ist der geringe Röntgenkontrast zwischen dem Harz und der Holzstruktur problematisch, so dass letztlich nach einem alternativen Verfahren zur Probenpräparation gesucht wurde.

Um das Problem des geringen Röntgenkontrasts zu umgehen, muss die Fixierung nach dem Schneiden der Proben auf das Endmaß wieder entfernt werden. In diesem Zusammenhang bietet sich ein Einfrieren der Proben an. Um zu verhindern, dass die Fasern dabei aufquellen, werden die

Probekörper in flüssigem Stickstoff abgekühlt und anschließend zyklisch in ein Wasserbad getaucht. Durch die Schockfrostung haben die Fasern keine Möglichkeit aufzuquellen. Durch mehrmaliges Wiederholen der Prozedur entsteht ein massiver Eisblock, der auf der Bandsäge auf das erforderliche Endmaß geschnitten werden kann.

Abbildung 26 Versuchsaufbau zur Probenpräparation im gefrorenen Zustand; Wechselweises eintauchen in flüssigen Stickstoff und Wasser (Links); In Kunststoffcontainer überführte und durch Sublimierung in der Vakuumkammer getrocknete Proben mit 5 x 5 mm Querschnitt

Um die fragilen Probenquerschnitte zu stabilisieren werden die „Eissticks“ in kleine Kunststoffcontainer überführt und anschließend getrocknet. Da ein normales Auftauen dazu führen würde, dass das abfließende Wasser die Faserstruktur beeinflusst, bzw. die Fasern durch Kontakt mit flüssigem Wasser aufquellen, werden die gefrorenen Sticks in einer Vakuumkammer gelagert, um das Eis durch Sublimation direkt in Wasserdampf zu überführen.

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden Proben für die Varianten B3, B4, B5 und B6 präpariert (Abbildung 26).

IV.2.13.1.2 Versuchsdurchführung am ESRF

Die Proben wurden an der Strahllinie ID19 der European Synchrotron Facility (ESRF) in Grenoble, Frankreich gescannt. Dafür wurde eine Photonenenergie von 19 keV (pink) mit einharmonischem Undulator (Typ u17.6) als Quelle genutzt. Die resultierende homogene Wellenfront ist exzellent geeignet für Phasenkontrast-Bildgebung auf der Basis der Wellenausbreitung (Kamera-Detektor-Abstand: 20 mm, Detektor-Pixelgröße: 0.65 µm). Phasenrekonstruktion mit konstantem Abstand (single-distance phase-retrieval) wurde mit einer unscharfen Maske kombiniert, um hohen Kontrast zu erreichen und so die anschließende Segmentierung zu erleichtern.

Volumenrenderings der rekonstruierten 3D Bilder sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 zu sehen.

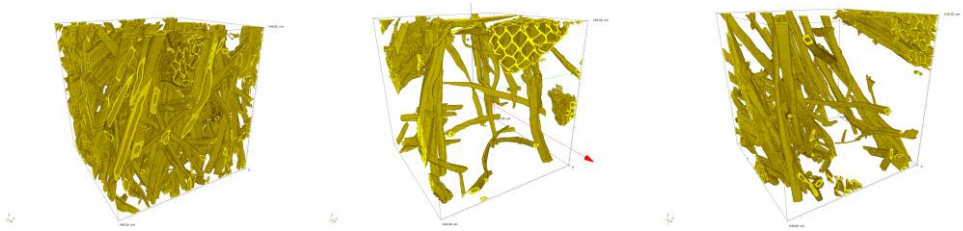


Abbildung 27 Volumenrenderings von (650nm)³ großen Ausschnitten aus den hochaufgelösten SRµCT Datensätzen der Faserproben F3, F5, F7 (von links).

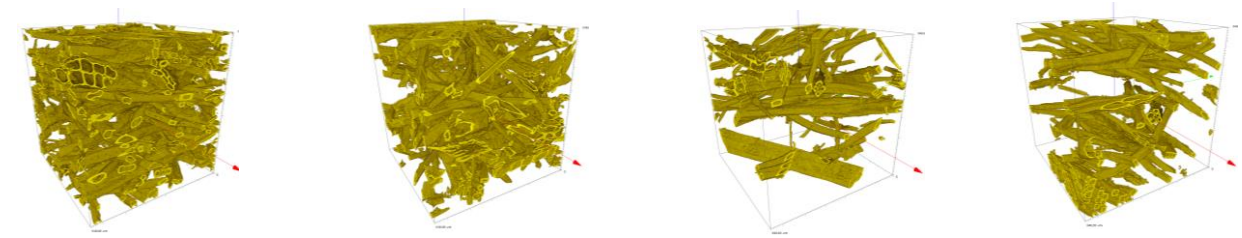


Abbildung 28 Volumenrenderings von (650nm)³ großen Ausschnitten aus den hochaufgelösten SRµCT Datensätzen der Plattenproben B3-B6 (von links).

IV.2.13.2 µ-CT

Im Laufe des Projekts wurden am ITWM mit dem hauseigenen Computertomografen diverse Proben mit verschiedenen Analysezielen und demzufolge nominellen Auflösungen abgebildet, siehe z.B. Abbildung 29. Der Tomograf des ITWM ist mit einer Feinfocus FXE 225.51 Röntgenröhre mit maximaler Beschleunigungsspannung 225 kV und maximaler Leistung 20 W ausgestattet und einem Perkin Elmer Flachbettdetektor XRD 1621 mit 2 048×2 048 Pixeln. Für die schwachabsorbierende Zellulose wurde eine eher geringe Röhrenspannung von 120 kV und eine eher hohe Integrationszeit von 1 s gewählt. Rekonstruiert wurde anhand von1 200 Projektionen, jeweils gemittelt über 4 Einzelprojektionen, was eine Gesamtintegrationszeit von 4s ergibt.

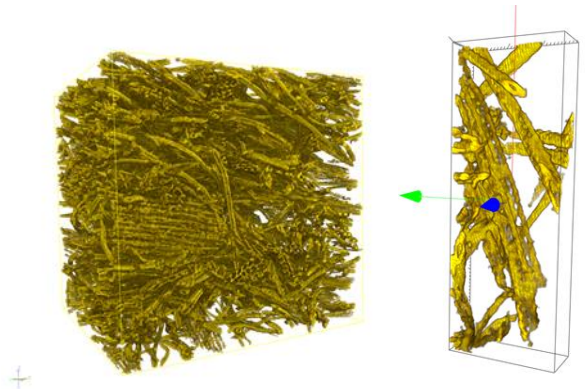


Abbildung 29 Links: Volumenrendering von B0. Visualisiert sind 422 x 494 x 478 Pixel, d.h. ca. 1.4mm x 1.7mm x 1.6mm. Rechts: Ausschnitt mit längs angeschnittenem Faserbündel.

Überblicksscans zur Untersuchung der Schichtung

Überblicksscans mit Voxelkantenlänge ca. 12µm dienten zunächst der Untersuchung der Homogenität und sollten eventuell auftretende Schichtungen bezüglich Volumenanteil und Orientierung aufdecken.

Die beobachteten Flächenanteilsprofile entsprachen jedoch nicht den erwarteten. Erhöhen der Auflösung auf Voxelkantenlänge 3.8µm führte zu visuell deutlich ansprechenderen Grauwertbildern jedoch keiner signifikanten Veränderung der Flächenanteilsprofile. Siehe Abbildung 30.

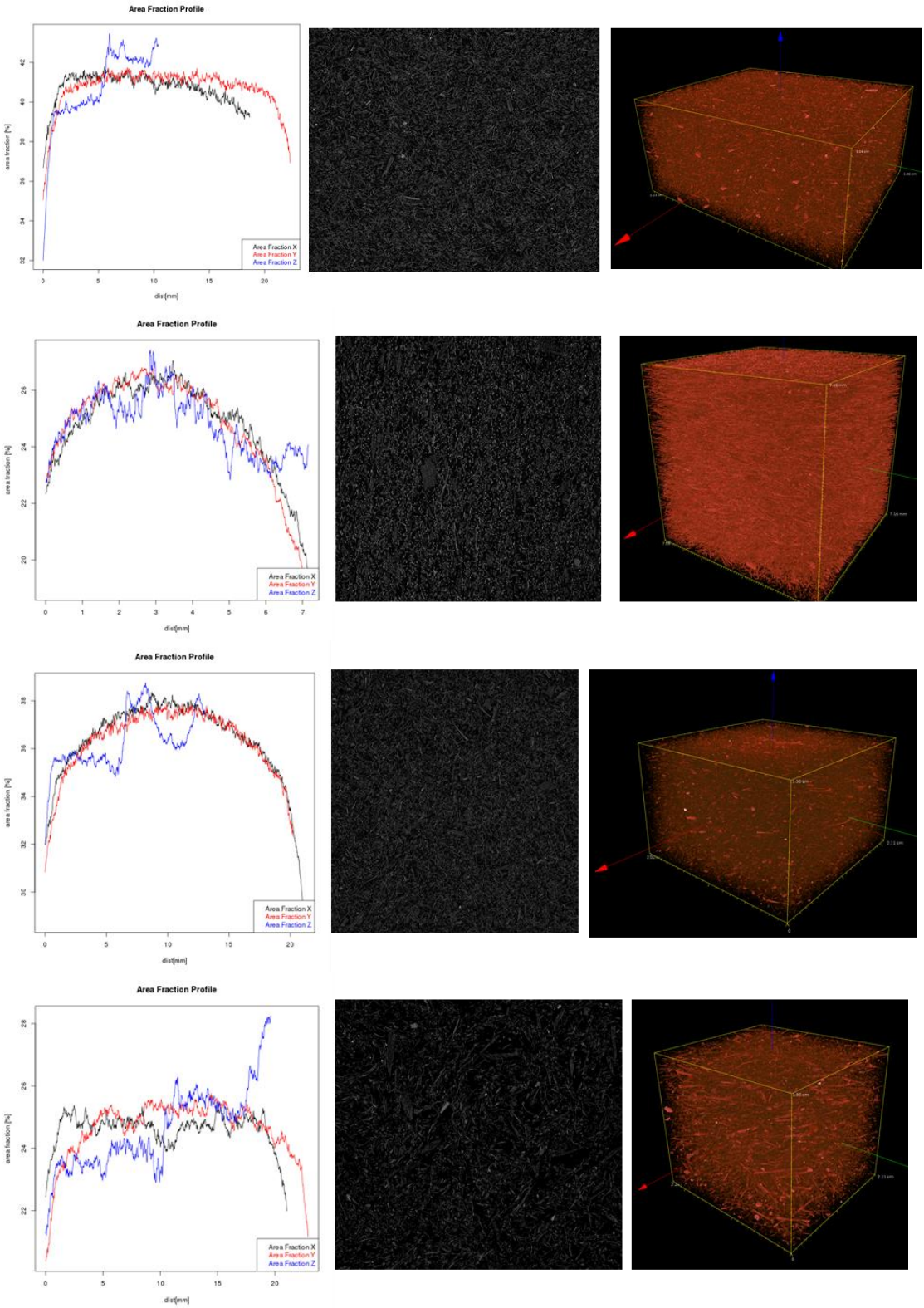


Abbildung 30 Ergebnisse für Überblicksscans für B1 mit 12 und mit 3.8µm Voxelkantenlänge und B2 und B7 mit 12µm Voxelkantenlänge (von oben nach unten). Von links nach rechts: Volumenanteilsprofile, repräsentativer Schnitt durch das Grauwertbild und Volumenrendering.

IV.2.14 Mikrostruktursimulation

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit Hilfe der Software GeoDict [GeoDict 2021] ermittelt. GeoDict ist eine Simulationssoftware der Math2Market GmbH, welche neben der Strukturgenerierung und umfangreichen Visualisierungsmöglichkeiten auch Komplettlösungen in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern liefert. Beispiele dafür sind die Bildverarbeitung, die Strömungssimulation, das Materialverhalten unter mechanischer Belastung bis hin zur Berechnung und Auslegung von Batterien.

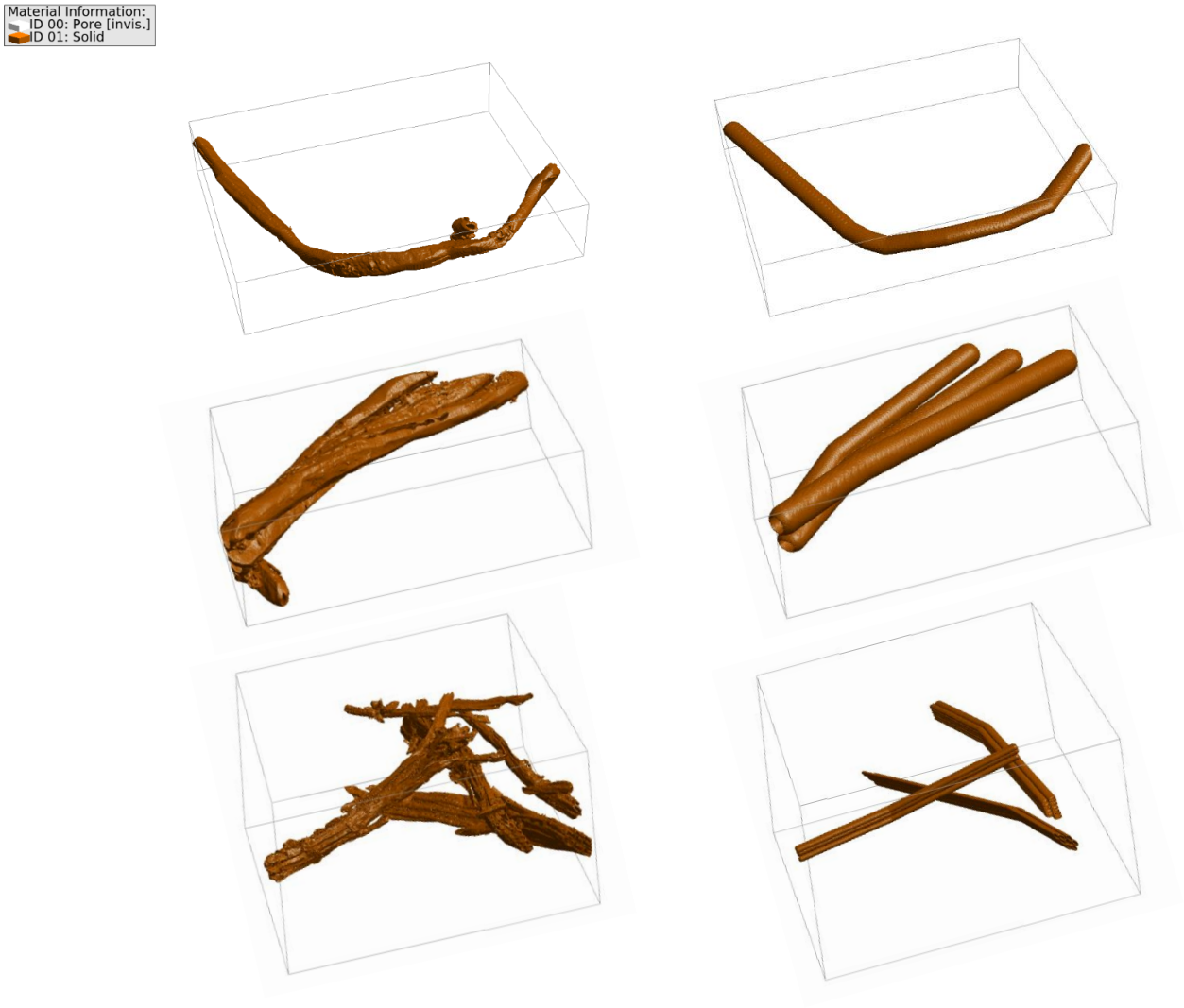


Abbildung 31 Fasern (oben), Flöße (Mitte) und Brocken (unten) anhand von µCT Aufnahmen (links) sowie nachgebildet mit GeoDict (rechts)

Zur Nachbildung der realen Strukturen sollen zunächst einzelne Fasern von CT-Aufnahmen des Dämmstoffes extrahiert werden. Dabei erfolgt eine Klassifizierung in drei unterschiedliche Bestandteile:

- Einzelfasern
- Faserbündel in einer Ebene (Flöße)
- mehrere gestapelte Ebenen von Faserbündeln (Brocken)

In GeoDict [GeoDict 2021] werden diese Komponenten zunächst einzeln modelliert, wobei der Fokus hier auf den Gesamtproportionen bezüglich Durchmesser, dem Volumen sowie der Anordnung bzw. Krümmung der Fasern liegt. Abbildung 31 zeigt exemplarisch für alle drei Kategorien die CT-Aufnahme sowie die nachempfundene, rauschfreie Geometrie. Die daraus entstandene Datenbank ermöglicht eine Superposition zur finalen Gesamtstruktur. Hierzu können zunächst unterschiedliche Kombinationen der Bestandteile zusammengestellt werden und diese dann anschließend noch im Durchmesser und der Länge skaliert sowie in ihrer Orientierung manipuliert werden.

V. Meilenstein 1: Mikrostrukturcharakterisierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Meilenstein 1, Mikrostrukturcharakterisierung zusammengefasst.

V.1 Physikalische Charakterisierung

Die physikalische Charakterisierung der initialen Beprobung (Tabelle 3) umfasst zunächst die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, die Bestimmung des Strömungswiderstands, die Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung, die Bestimmung der Reindichte der Faservarianten und die optische Bestimmung der Fasergrößen. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

V.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Abbildung 32 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Varianten B1 – B7, sortiert nach den jeweiligen Verfahren der Herstellung (Nassverfahren, Trockenverfahren, Flex). Die Werte sind erwartungsgemäß unterschiedlich. Den absolut niedrigsten Wert hat die Variante B6 mit einer Wärmeleitfähigkeit von 35.4 mW/(m K). Niedrige Werte erreichen außerdem die Varianten B4 (37.2 mW/(m K)), B5 (37.6 mW/(m K)) und B7 (38.4 mW/(m K)). Die Varianten B1, B2 und B3 weisen eine Wärmeleitfähigkeit > 40 mW/(m K) auf.

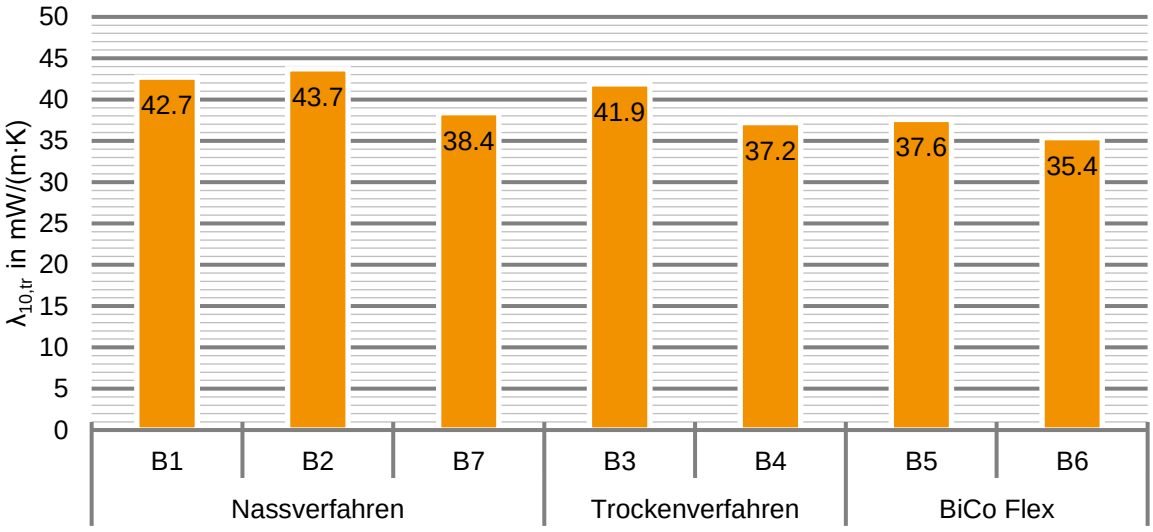


Abbildung 32 Wärmeleitfähigkeit der Varianten B1 – B7, 10°C Probenmitteltemperatur, 15 K Temperaturdifferenz, absolut trocken

V.1.2 Strömungswiderstand

Abbildung 33 zeigt den Strömungswiderstand der Variante B1 – B7. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Produkten, die im Wesentlichen über die Produktgruppen gruppiert sind. Die höchsten Strömungswiderstände zeigen die Platten im Nassverfahren (B1, B2, B3), gefolgt von den Platten im Trockenverfahren (B3, B4) und den flexiblen Matten (B5, B6).

Betrachtet man die Einzelwerte der Bestimmung des Strömungswiderstands (Abbildung 34), so fällt auf, dass insbesondere die Varianten im Nassverfahren eine höhere Variation der Werte aufweisen. Dies könnte mit einer inhomogeneren Struktur aufgrund des Verfahrens der Mattenbildung durch

Aufschlemmen der Fasersuspension auf einem Langsieb erklärt werden. Ebenfalls von Einfluss ist aber sicher auch die schlechtere Einpassung der Probekörper in den Messzylinder. Durch die insgesamt dünneren Proben aus dem Nassverfahren, könnten größere Leckagen im Randbereich der Probe entstehen.

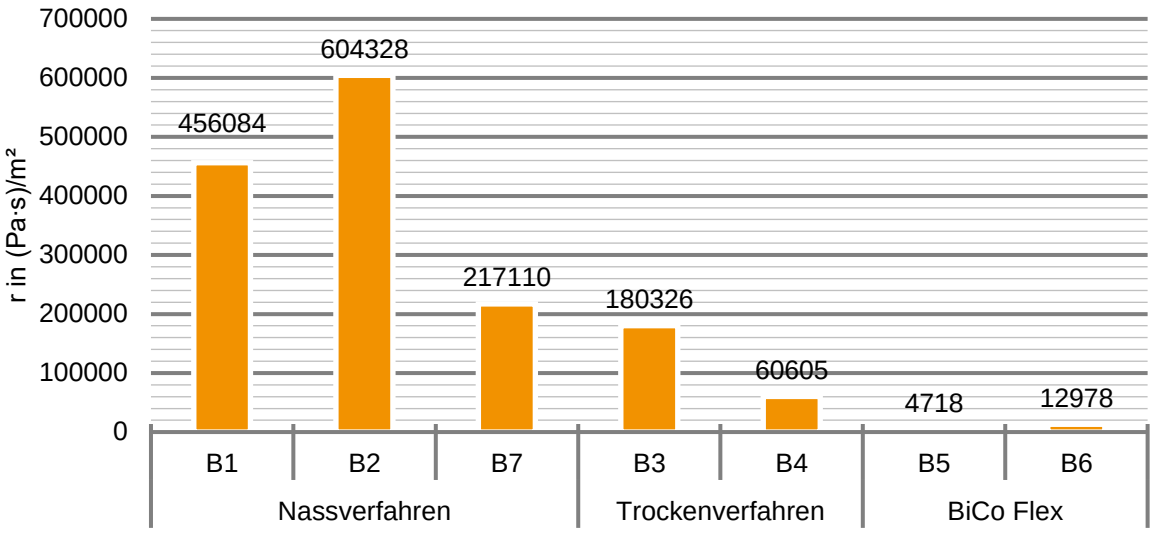


Abbildung 33 Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7 (Mittelwerte)

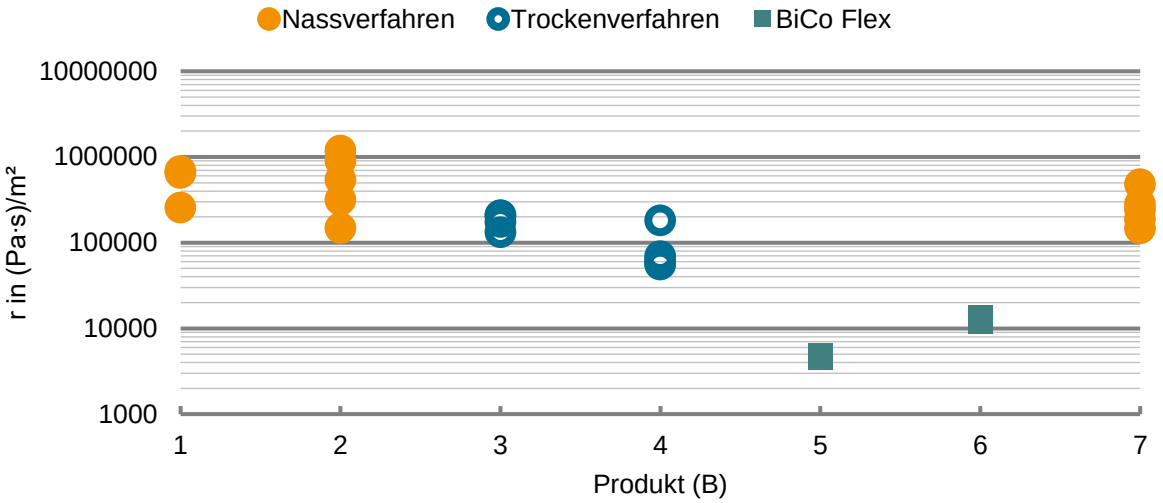


Abbildung 34 Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7 (Einzelwerte)

V.1.3 Verhalten bei Druckbeanspruchung

Die Druckspannung bei 10 % Stauchung zeigt Abbildung 35. Das E-modul zeigt Abbildung 36. Erwartungsgemäß staffeln sich die Werte entsprechend den Rohdichten der Varianten. Die höchsten mechanischen Werte weisen die Varianten mit höherer Rohdichte (B1, B2, B3) auf, gefolgt von den Varianten B4 und B7. Die flexiblen Matten B5 und B6 weisen nur eine geringe Druckfestigkeit und Steifigkeit auf.

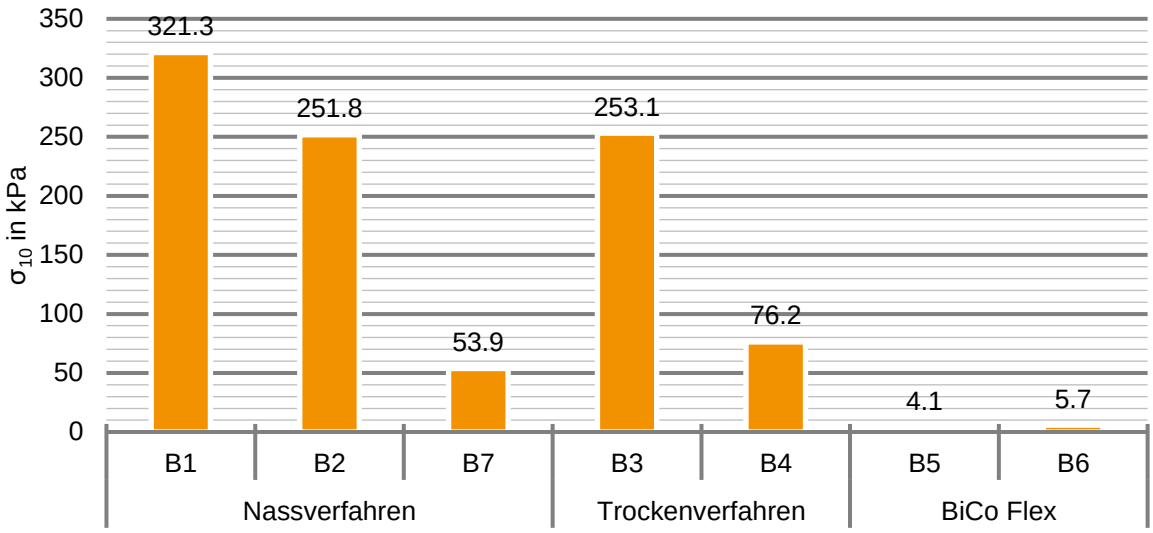


Abbildung 35 Druckspannung bei 10 % Stauchung der Varianten B1 – B7

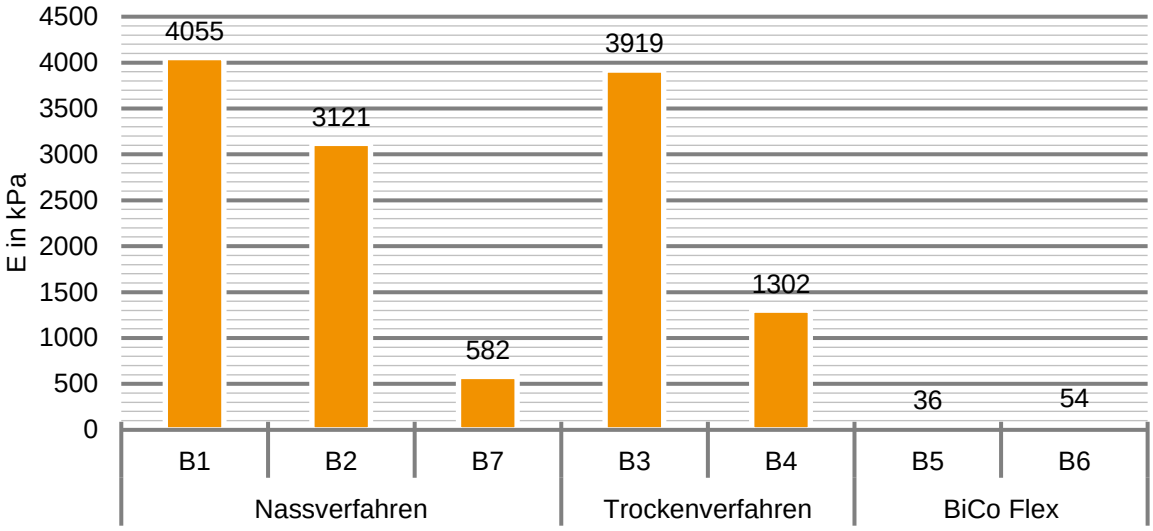


Abbildung 36 E-modul bei Druckbeanspruchung der Varianten B1 – B7

V.1.4 Wärmeleitfähigkeit als Funktion anderer Variablen

Ein signifikanter Zusammenhang besteht zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte. Die Werte sind in Abbildung 37 für die Varianten B1 – B7 gegenübergestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit der Rohdichte. Die niedrigsten Werte liegen im Bereich von ca. 50 – 120 kg/m^3.

Interessant ist der Unterschied in der Wärmeleifähigkeit bei Proben ähnlicher Rohdichte. Besonders deutlich differenziert sind in dieser Hinsicht die Proben B3 (Trockenverfahren) und B7 (Nassverfahren). Die Unterschiede könnten hier im Herstellverfahren begründet liegen. Während die Proben aus dem Trockenverfahren beleimt sind, liegen beim Nassverfahren praktisch ausschließlich mechanisch verfilzte Fasern vor, was entsprechend erhöhte Kontaktwiderstände zwischen den Partikeln mit sich bringen könnte. Die These wird dadurch gestützt, dass beide Produkte ähnliche Strömungswiderstände aufweisen – also der Struktur nach vergleichbar sind.

Eine ebenfalls deutliche Differenzierung ergibt sich bei den flexiblen Matten zwischen B5 und B6. Hier weist das Produkt mit der niedrigeren Dichte (B5) eine höhere Wärmeleitfähigkeit als das Produkt mit der höheren Dichte (B6) auf. In diesem Fall ist das Produktionsverfahren vergleichbar. Es zeigt sich aber eine deutliche Differenzierung zwischen den Strömungswiderständen (Abbildung 38). Die Variante B5 weist einen niedrigeren Strömungswiderstand auf. Dies indiziert eine zumindest unterschiedliche Struktur zu B6. Die niedrigeren Strömungswiderstände könnten durch größere und ggf. besser miteinander vernetzte Porenvolumen beeinflusst sein. Eine Erhöhung des Anteils an Wärmestrahlung und evtl. bessere Wärmeleitung in insgesamt gröberen Partikeln wäre die Folge, was sich in den Werten der Wärmeleitfähigkeit widerspiegelt.

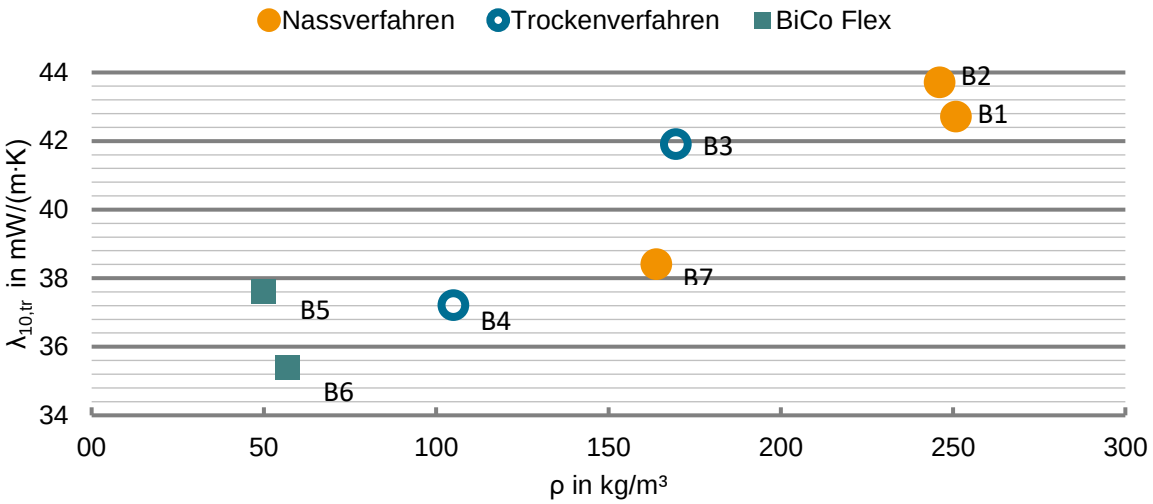


Abbildung 37 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte der Varianten B1 – B7

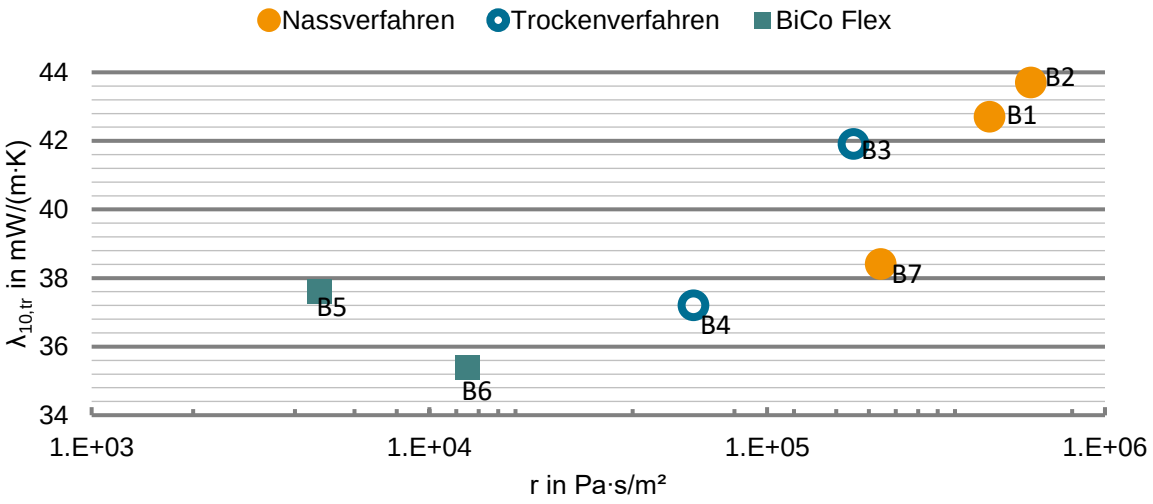


Abbildung 38 Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand der Varianten B1 – B7

V.1.5 Rohdichteprofile

An den untersuchten Varianten B1, B2, B3, B4 und B7 wurden mit dem Rohdichteprofilmessgerät Dense-Lab Rohdichteprofile ermittelt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 39.

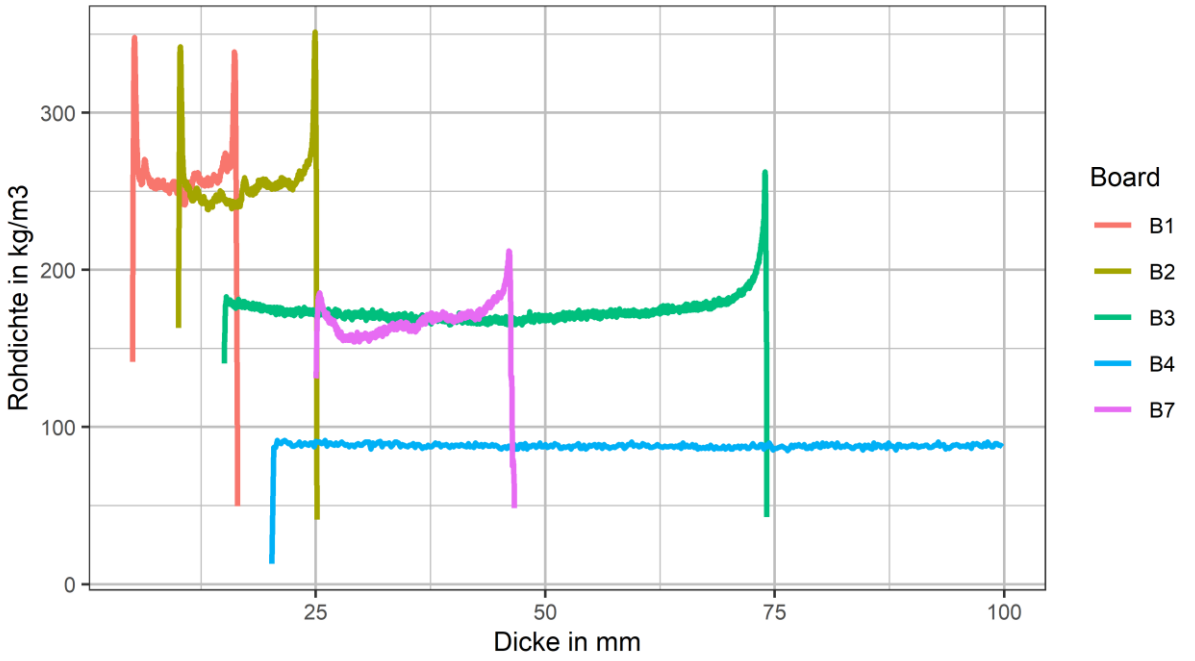


Abbildung 39 Rohdichteprofile für die Varianten B1, B2, B3, B4 und B7 (Rohdichteprofilmessgerät Dense-Lab)

Ein Vergleich der Varianten B1 und B2 (Nassverfahren) zeigt ein jeweils ähnliches Rohdichteprofil. Durch die Erhöhung der Plattendicke bei ansonsten gleichem Stoffauflauf wird das Rohdichteprofil gestreckter und die mittlere Rohdichte senkt sich ab. Die Verdichtung in den Decklagen ist trotzdem auf einem vergleichbaren Niveau. Das Rohdichteprofil von Variante B2 ist leicht asymmetrisch mit einer Verschiebung der Massen in Richtung Plattenunterseite. Dies kann durch die Entwässerung im Zuge der Mattenbildung erklärt werden und ist damit erwartungsgemäß.

Die dritte Variante im Nassverfahren, B7 hat eine deutlich niedrigere Dichte und ebenfalls ein leicht asymmetrisches Rohdichteprofil.

Bei der Variante B3 fällt die niedrigere Rohdichte der oberseitigen Decklage auf. Der auf der Plattenunterseite erkennbare Peak ist hier durch das Schleifen der Decklage entfernt. Trotzdem ist eine Rohdichteabsenkung in der Mittellage erkennbar.

Die Ergebnisse der Variante B4 sind größenordnungsmäßig plausibel. Ein Rohdichteprofil ist praktisch nicht zu erkennen. Wie in IV.2.12 beschrieben wurden hier jedoch Hilfsschichten aus Kunststoff beigelegt um das Rohdichteniveau in einen messbaren Bereich zu heben. Inwieweit das Verfahren Einfluss auf die Auflösung hat, konnte nicht überprüft werden.

V.1.6 Reindichte und Porosität

Die Reindichte der untersuchten Platten- und Mattenvarianten B1 – B7 wurde mit dem Helium-Pyknometer (IV.2.7) untersucht. Die Ergebnisse repräsentieren den Mittelwert der Reindichte inklusive Bindemittel (PMDI, Stützfaser) und Additiven. Um Unterschiede zwischen den Aufschlussbedingungen zu ermitteln wurde zusätzlich die Reindichte der zugehörigen Faserkollektive ohne reject gemessen (F1, F2, F4, F6, F8). Für die Platten- und Mattenmuster wurde basierend auf den Werten der Reindichte auch die Porosität bestimmt (Tabelle 14).

Tabelle 14 Reindichte und Porosität der untersuchten Platten / Matten sowie der Fasern (ohne reject und Additive) (Mittelwerte)

Platte	Reindichte	Porosität	Faser	Reindichte
-	in g/cm³	in %		in g/cm³
B1	1.438	81.7	F1	1.427
B2	1.427	82.1		
B3	1.381	87.1	F2	1.404
B4	1.369	92.0		
B5	1.432	96.7	F4	1.434
B6	1.427	95.9	F6	1.462
B7	1.417	87.8	F8	1.455
-	-	-	Bico	0.928

Die ermittelten Unterschiede in der Reindichte sind verhältnismäßig gering. Auffällig ist, dass praktisch alle Varianten B1 – B7 und alle Fasern (mit Ausnahme von F6 und F8) mehr oder weniger deutlich unter dem Literaturwert von 1.45 g/cm³ (vgl. II.1.6) für die reine Holz-Zellwand liegen (Abbildung 40). Dies kann einerseits der Methode geschuldet sein. Unter Umständen dringt das Messgas (Helium) nicht in alle intrapartikulären Hohlräume (insbesondere von Faserbündeln) ein. Andererseits können insbesondere bei den Platten bzw. Matten die Anteile von Additiven und Bindemitteln mit niedrigerer Reindichte für die abweichenden Werte und Unterschiede verantwortlich sein.

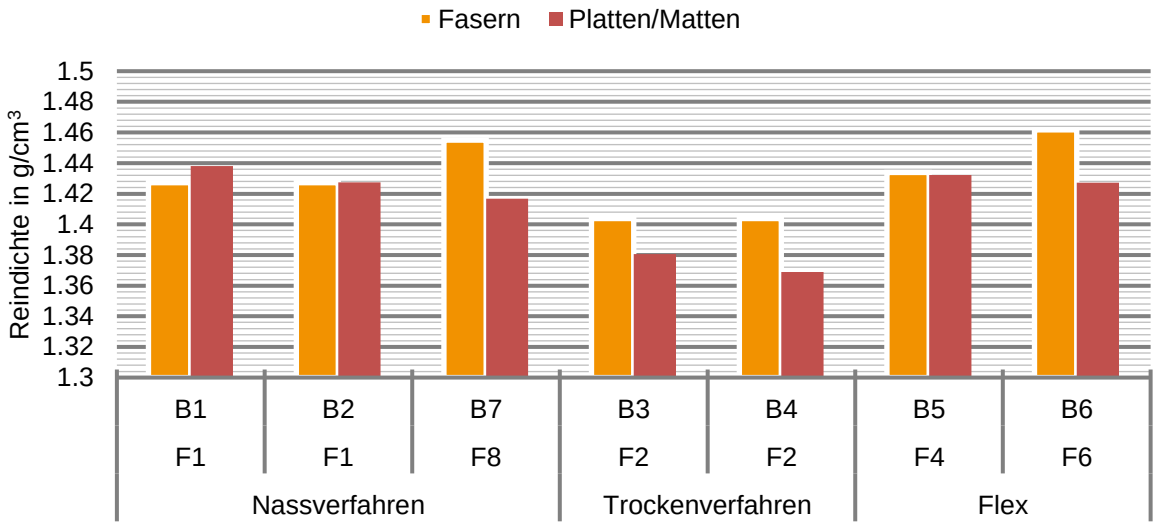


Abbildung 40 Reindichte der Fasern (ohne reject / Bindemittel) und daraus hergestellter Platten/Matten (Mittelwerte)

Eine gute Übereinstimmung zwischen der Reindichte der Fasern und daraus hergestellter Dämmstoffe liegt für die Varianten B1 und B2 sowie B5 vor. Die deutliche Abweichung zwischen der nah am Literaturwert liegenden Faserdichte von F8 mit dem deutlich niedrigeren Wert für die daraus hergestellte Platte B7 erschließt sich nicht.

Auffällig ist der bei den Platten im Trockenverfahren jeweils niedrigere Wert der Reindichte der Platten im Verhältnis zum Wert der Reindichte der Fasern. Neben dem beschriebenen Einfluss des PMDI Bindemittels von niedrigerer Dichte könnte dies auch durch ein Coating der Fasern- bzw. Faserbündel

mit PMDI erklärt werden, wodurch ein Verschluss der intrapartikulären Strukturen (insbesondere bei Faserbündeln) erzielt würde.

Bei den Flex Varianten liegen die Faser- und Mattenreindichte für die Kombination F4 / B5 auf dem gleichen Niveau, während die Reindichte der Matte bei der Variante B6 gegenüber der Faser F6 deutlich niedriger ist.

Um zu klären, ob die Reindichte des Dämmstoffs gegenüber der Faser bei den Varianten B3/B4 bzw. B6 durch die Mischung mit PMDI bzw. Bico in der gemessenen Größenordnung beeinflusst werden kann, wurde für PMDI, bzw. Bico-Anteile von 1 – 10 % die theoretische Reindichte der Mischung errechnet. Für die Bico Faser wurde die gemessene Reindichte von 0.928 g/cm^3 angesetzt. Für PMDI wurde ein Wert von 1.25 g/cm^3 angenommen.

Eine Reduzierung der gemessenen Faserreindichte von 1.404 g/cm^3 auf einen Wert von ca. 1.37 – 1.38 g/cm^3 (entsprechend B3/B4) würde PMDI Anteile > 10 m-% entsprechen, was nicht plausibel ist. Erklärlicher ist damit der beschriebene Einfluss der gecoateten Partikel, wodurch mehr Hohlräume innerhalb der Partikel gegenüber dem Helium verschlossen bleiben.

Bei der Faservariante F6 hingegen bewirkt die Mischung mit einem Bico Anteil von 7 % eine Absenkung der Reindichte von 1.462 g/cm^3 auf 1.424 g/cm^3, was im Bereich der Messwerte für die Matte B6 liegt. Diese Differenzierung liegt im Bereich möglicher Werte für den Bico-Anteil. Unklar bleibt, warum bei der Variante B5 dann kein Unterschied zur zugehörigen Faser F4 vorliegt. Evtl. besteht auch ein Problem mit der Repräsentativität der Proben.

Tabelle 15 Theoretische Reindichte basierend auf Mischungen zwischen Holzfaser und Bindemittel (PMDI, Bico) mit 1 – 10 m-% Anteil

Reindichte in g/cm^3 Einzelmaterialien				Massenanteile in -		Reindichte in g/cm^3 Mischung	
F2	F6	PMDI	Bico	Holz	PMDI/Bico	F2 / PMDI	F6 / Bico
1.404	1.462	1.25	0.928	0.99	0.01	1.402	1.456
1.404	1.462	1.25	0.928	0.98	0.02	1.401	1.451
1.404	1.462	1.25	0.928	0.97	0.03	1.399	1.446
1.404	1.462	1.25	0.928	0.96	0.04	1.398	1.440
1.404	1.462	1.25	0.928	0.95	0.05	1.396	1.435
1.404	1.462	1.25	0.928	0.94	0.06	1.395	1.430
1.404	1.462	1.25	0.928	0.93	0.07	1.393	1.424
1.404	1.462	1.25	0.928	0.92	0.08	1.391	1.419
1.404	1.462	1.25	0.928	0.91	0.09	1.390	1.414
1.404	1.462	1.25	0.928	0.9	0.1	1.388	1.408

Die Repräsentativität der Proben ist generell ein Problem. Bei einem Vergleich von Einzelwerten der Messungen an den Varianten sind beispielsweise durchaus Abweichungen zwischen unterschiedlichen Probengrößen zu beobachten.

Eine Gegenüberstellung der Werte der Wärmeleitfähigkeit mit der Reindichte und der Porosität zeigen Abbildung 41 und Abbildung 42.

Ein Einfluss der Reindichte auf die Wärmeleitfähigkeit ist über die untersuchten Plattenvarianten hinweg nicht erkennbar. Interessant ist jedoch die Anordnung der Wertepaare innerhalb der

Herstellverfahren, bei denen jeweils die Variante mit der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit auch die niedrigere Reindichte aufweist. Dieser Effekt ist jedoch in erster Linie auf die abgestuften Rohdichtebereiche zurückzuführen. Dementsprechend verändert der Bezug auf die Reindichte bei der Berechnung der Porosität (Abbildung 42) auch nicht die bekannte Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte (Abbildung 37).

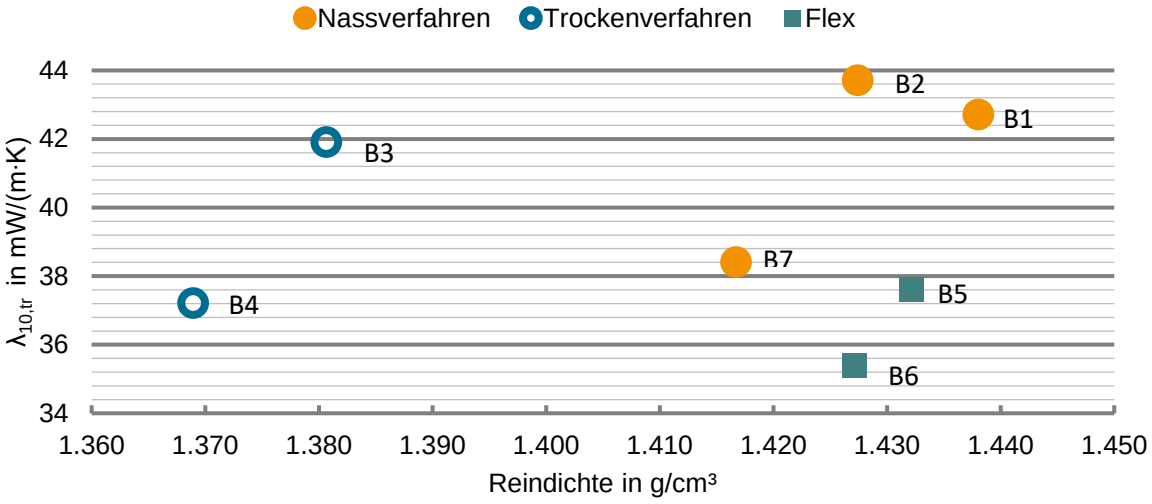


Abbildung 41 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Reindichte für die Varianten B1 – B7

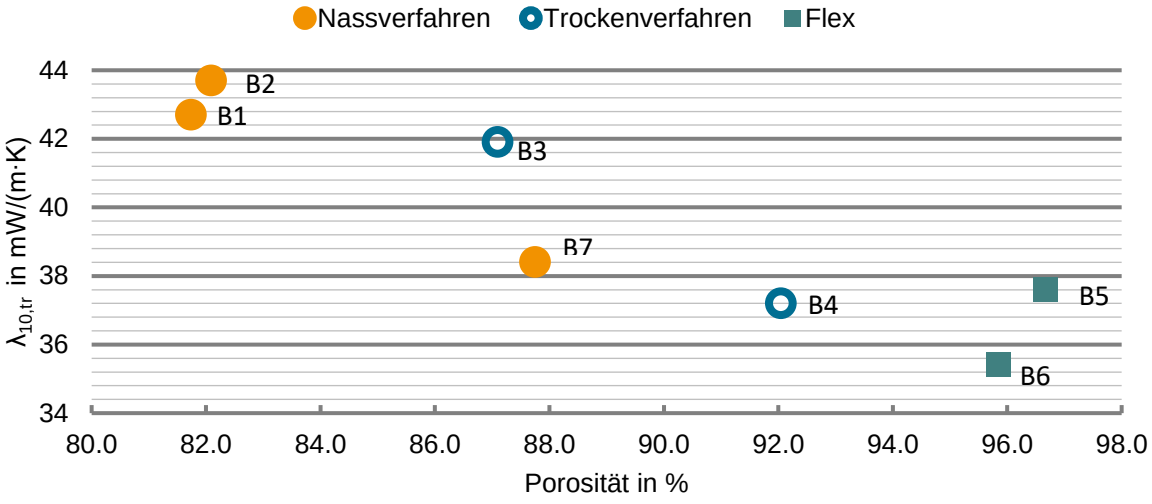


Abbildung 42 Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Porosität für die Varianten B1 – B7

V.1.7 Partikelgrößenanalyse (Fasern und Hackschnitzel)

Im Folgenden sind Auswertungen zu Partikelgrößen der untersuchten Fasern und Hackschnitzel dargestellt.

V.1.7.1 Optisches Verfahren (2D-Scanner)

Die Massenverteilungssumme der Faserlängen (Abbildung 43) und Faserbreiten (Abbildung 44) sowie die Gegenüberstellung der Mediane dieser Verteilungen (Abbildung 45) kann weiteren Einblick in die Struktur der Proben geben.

Bei einem Vergleich der Faserlängen fällt auf, dass die im Nassverfahren produzierten Fasern F1 (B1, B2) und F8 (B7) kürzere Fasern enthalten als die Fasern aus dem Trockenverfahren F2, F3 (mit reject) (B3, B4). Die längsten Fasern enthalten die Faserkollektive F4, F5 (mit reject) (B5) und F6, F7 (mit reject) (B6).

Innerhalb der Produktgruppen zeigt die Faser F1 (B1, B2), kürzere Fasern als F8 (B7). Ein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit kann aufgrund der großen Unterschiede in der Rohdichte der Produkte nicht abgeschätzt werden. Die längere Faser trägt aber vermutlich zu einer für die Wärmeleitfähigkeit günstigen Mikrostruktur bei.

Bei den Varianten B3 und B4 aus dem Trockenverfahren wurde jeweils die gleiche Faser F4 eingesetzt.

Bei einem Vergleich der Faserlängen von F5 (B5) und F7 (B6) fällt auf, dass die Variante F7 eine insgesamt schlankere Verteilung aufweist, d. h. weniger Feinanteil und einen steileren Anstieg hin zu größeren Faserlängen aufweist als die Variante F5. Die der Faser F7 zugehörige Matte B6 weist eine gegenüber B5 niedrigere Wärmeleitfähigkeit und höheren Strömungswiderstand auf, was mit einem geringeren Feinanteil und weniger groben Fasern erklärbar wäre.

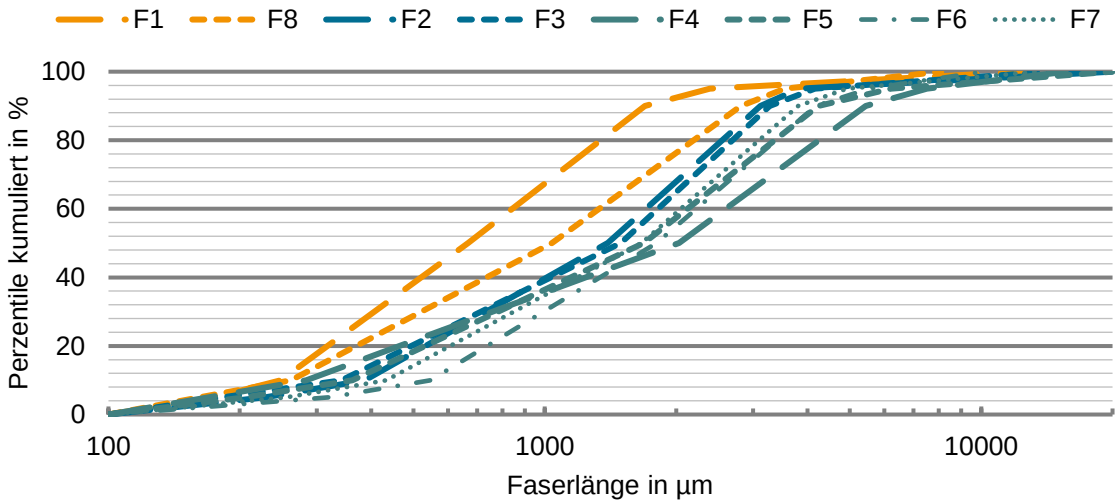


Abbildung 43 Massenverteilungssumme der Faserlängen (gewichtet nach der Projektionsfläche) der Fasern F1 – F8 (Auswertung A)

Betrachtet man die Massenverteilungssumme der Faserdurchmesser (Abbildung 44), so fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den Produktgruppen nicht so stark ausgeprägt sind, wie bei den Faserlängen. Die Faserdurchmesser von F1, F8, F3 und F4 liegen eng beisammen. Differenziert zeigen sich die Faserdurchmesser der Varianten F5 und F7. Gegenüber dem Nass- und

Trockenverfahren werden hier etwas größere Faserdurchmesser erreicht. Faser F4, F5 (reject) für die Matte B5 weisen etwas niedrigere Faserdurchmesser als Faser F6, F7 (reject) für die Matte B6 auf.

In Bezug auf die Charakteristik der Verteilung hebt sich im Wesentlichen die Faser F6 ab. Dieses Kollektiv ist die Rohfaser (ohne reject) aus der Herstellung der Matte B6 mit der insgesamt niedrigsten Wärmeleitfähigkeit. Die Verteilung der Faserdurchmesser ist hier gleichmäßiger als bei den anderen Varianten, die allesamt eine leicht rechtsschiefe Verteilung, d. h. eine Überrepräsentation kleiner Faserdurchmesser, welche vermutlich durch Feinanteil, d. h. auch entsprechend kurze Partikel, verursacht sind.

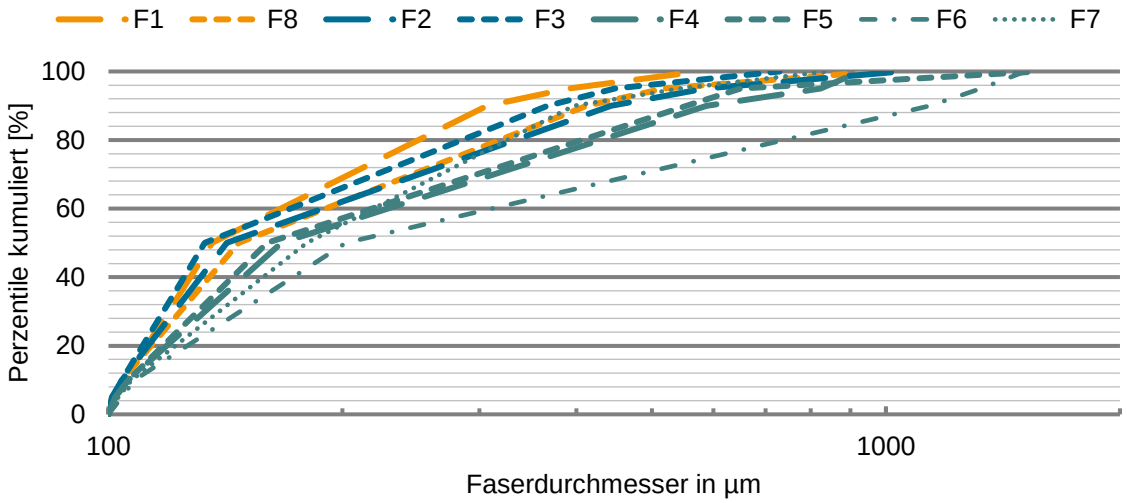


Abbildung 44 Massenverteilungssumme der Faserdurchmesser (gewichtet nach der Projektionsfläche) der Fasern F1 – F8 (Auswertung A)

Eine Gegenüberstellung der Mediane der Faserlängen und Faserbreiten zeigt Abbildung 45. Die vorher anhand der Verteilungen vorgenommene Bewertung hinsichtlich der Abstände von Faserlängen und Faserdurchmesser zwischen den Gruppen zeigt sich nochmal deutlicher. Während bei den Medianen der Faserlänge eine relativ klare Differenzierung zwischen Nassverfahren (orange), Trockenverfahren (blau) und Flex (grün) zu erkennen ist, die auch in Anbetracht der Auflösung des optischen Scanners mit ca. 20 µm/px signifikant sind, liegen die Mediane der Faserdurchmesser verhältnismäßig eng beisammen und teilweise im Bereich der Auflösung des Messverfahrens.

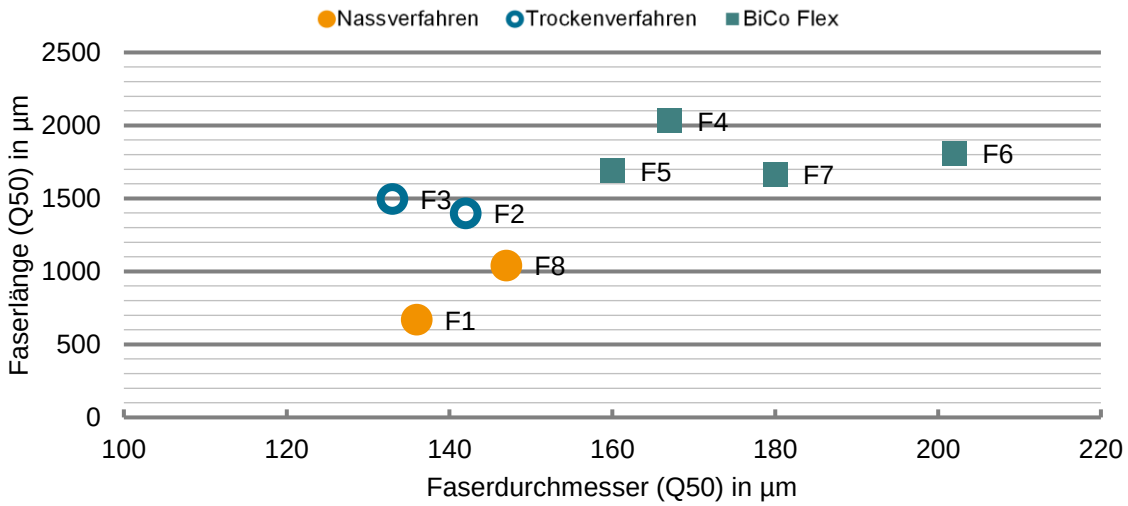


Abbildung 45 Median der Faserlänge in Gegenüberstellung zum Median des Faserdurchmessers der Fasern F1 – F8 (Auswertung A)

Deutlich wird in Abbildung 45 außerdem der Unterschied zwischen den Kollektiven mit und ohne reject. Die Varianten mit reject (F3, F5, F7) enthalten den Werten nach durchgehend etwas kleinere Faserdurchmesser als die gleiche Faser ohne reject (F2, F4, F6), was aber mit Ausnahme des Vergleichs zwischen F6 und F7 sicher im Bereich der Unsicherheit des Messverfahrens liegt. Bei den Flex Varianten zeigt sich außerdem eine jeweils geringere Faserlänge für die Varianten mit reject die signifikant sein könnte.

Die Verteilungen der Faserlänge für die Varianten F1 – F8 zeigt Abbildung 46 in anderer Darstellung (Auswertung B).

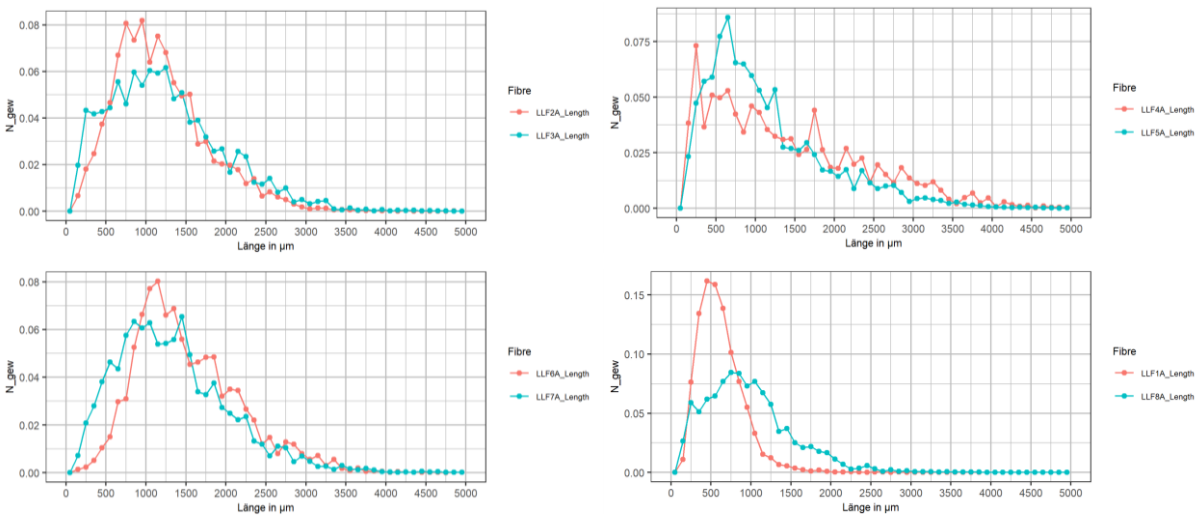


Abbildung 46 Flächengewichtete Häufigkeit der Faserlängen; Oben links: F2 (ohne Reject) und F3 (mit Reject); Oben rechts: F4 (ohne Reject) und F5 (mit Reject); Unten links: F6 (mit Reject) und F7 (ohne Reject); Unten rechts: F1 und F8 (Auswertung B)

Interessant ist auch die Gegenüberstellung von Faserlänge und -breite in einer heatmap. In dieser Darstellung kann visualisiert werden ob viele kurze, dicke Fasern oder lange dünne Fasern vorliegen. (Abbildung 47)

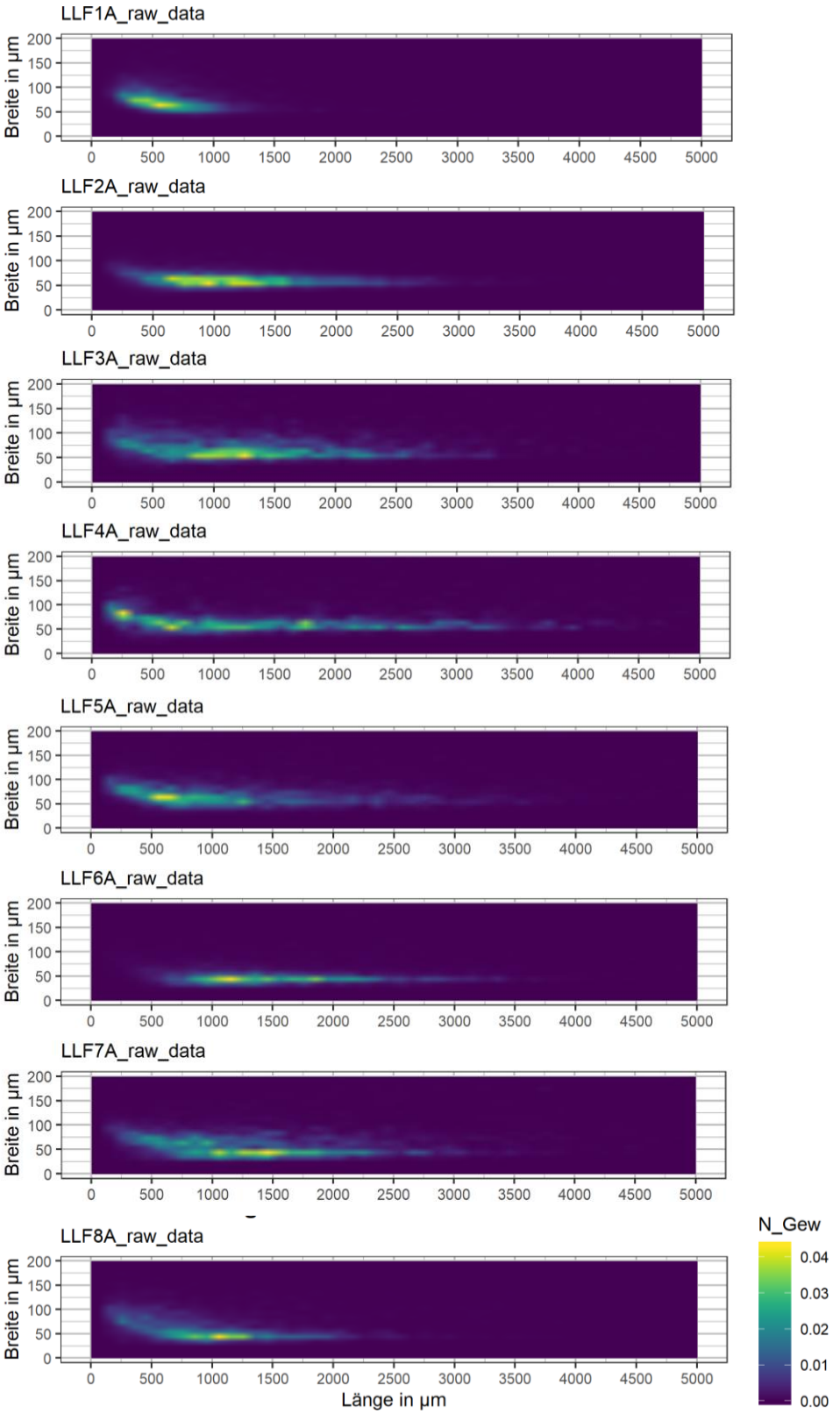


Abbildung 47 Flächengewichtete Häufigkeit von Faserlängen und Faserbreiten als heatmap (Auswertung B)

Interessant ist der Einfluss des reject auf die Histogramme in Abbildung 47. Bei einem Vergleich von LLF2 und LLF3, LLF4 und LLF5 sowie LLF6 und LLF7 wird deutlich wie in dem Kollektiv mit reject jeweils mehr kürzere und dickere Partikel sowie teilweise auch mehr längere und dickere Partikel repräsentiert sind. Besonders deutlich ist dies bei einem Vergleich von LLF6 und LLF7. Die sehr

definierte, fast monomodale Verteilung bei LLF6 erhält durch den reject deutlich mehr Anteile dickerer Fasern und auch mehr Fasern im Bereich < 500 µm Faserlänge.

V.1.7.2 Siebanalysen (Fasern)

Die Sieblinien der Fasern F3, F5 und F7 zeigt Abbildung 48. Die Sieblinie ist charakteristisch für das jeweilige Kollektiv, jedoch nicht zwangsläufig mit der Faserlänge oder dem Faserdurchmesser korreliert. Tendenziell screent die Sieblinie eher den Faserdurchmesser, da die Partikel jedoch unregelmäßig geformt, fibrilliert und gekrümmt sind, stellt die Sieblinie trotz der Verwendung von Siebhilfen keine Fasergrößenverteilung im eigentlichen Sinne dar.

Bei einem Vergleich der Sieblinien ist zu erkennen, dass die Faser F3 eine steilere Verteilung aufweist als die Fasern F5 und F7. Dies entspricht den Feststellungen aus der Fasergrößenvermessung von Länge und Breite. Die Fasern innerhalb des Flex Verfahrens F5 und F7 sind ebenfalls gut differenziert, wobei die Faser F5 (B5) insgesamt mehr Anteil in den gröberen Fraktionen aufweist als die Faser F7 (B6).

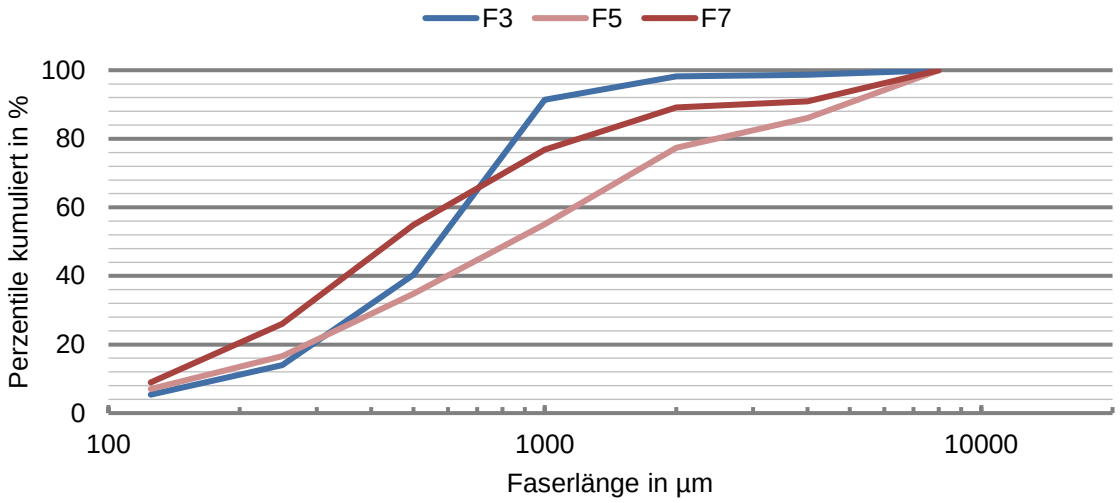


Abbildung 48 Sieblinie der Faserstoffe F3, F5 und F7

V.1.7.3 Siebanalysen (Hackschnitzel)

Die Hackschnitzelgrößenverteilungen (Abbildung 49) zeigen, dass die Hackschnitzel HS2 für das Trockenverfahren und Flex (entrindet) insgesamt kleinere Hackschnitzelgrößen beinhalten als die Hackschnitzel für das Nassverfahren (HS1 und HS3), wobei anzumerken ist, dass auch die Sortimente für das Nassverfahren relevante Unterschiede in den Verteilungen aufweisen.

Eine Beprobung der Hackschnitzel ist problematisch bzgl. der Repräsentativität. Aufgrund des großen Durchsatzes der Produktion kann nicht garantiert werden, dass die entnommenen Kollektive für die jeweils assoziierte Produktionscharge repräsentativ sind. Im Weiteren wurde deshalb auf die Beprobung der Hackschnitzel verzichtet.

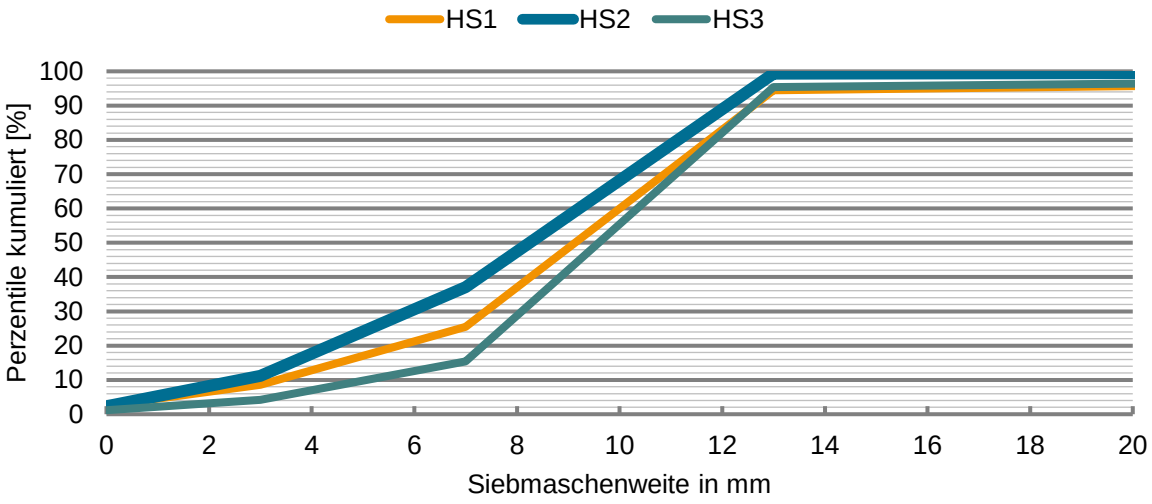


Abbildung 49 Massenverteilungssumme der Fraktionen aus der Siebanalyse der Hackschnitzelsortimente

V.1.8 Sorptionseigenschaften

Die Ergebnisse der Bestimmung des Sorptionsverhaltens zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16 Massebezogene Feuchtegehalte in % (bezogen auf atro) zur Bestimmung der Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B1 – B7 (sortiert nach Herstellverfahren) (grau hinterlegt: Adsorption, ohne Hinterlegung: Desorption)

RH [%]	Massebezogener Feuchtegehalt in % (bezogen auf atro)						
	Nassverfahren			Trockenverfahren		BiCo Flex	
	B1	B2	B7	B3	B4	B5	B6
0	0.2	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7
10	2.3	2.3	3.0	2.8	2.9	2.8	2.8
20	3.4	3.4	4.3	4.2	4.3	4.1	4.1
30	4.1	4.2	5.2	5.2	5.3	5.0	5.1
40	4.9	5.0	6.2	6.4	6.5	6.0	6.1
50	**5.8**	**5.8**	**7.1**	**7.4**	**7.6**	**7.2**	**7.2**
60	7.2	7.3	8.7	8.6	8.9	8.9	8.9
70	9.2	9.3	10.7	9.9	10.3	11.3	11.4
80	**11.8**	**11.9**	**13.4**	**11.5**	**12.0**	**16.4**	**16.2**
90	16.3	16.4	18.0	14.6	14.9	24.7	24.3
98	**25.7**	**25.8**	**28.0**	**22.9**	**23.1**	**54.0**	**54.3**
90	19.5	19.6	21.5	18.5	18.7	26.4	26.3
80	**15.4**	**15.5**	**17.0**	**15.1**	**15.2**	**19.3**	**19.1**
70	13.1	13.1	14.3	12.9	13.0	15.3	15.1
60	11.1	11.1	12.1	11.0	11.1	12.4	12.2
50	**9.7**	**9.7**	**10.5**	**9.5**	**9.6**	**10.3**	**10.2**
40	8.2	8.2	8.8	8.0	8.1	8.4	8.3
30	6.9	6.9	7.4	6.7	6.7	6.9	6.8
20	5.4	5.4	5.8	5.2	5.2	5.3	5.2
10	3.6	3.6	3.8	3.4	3.4	3.5	3.5
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Innerhalb der Varianten gleicher Herstellverfahren liegt zumeist ein jeweils ähnliches Sorptionsverhalten vor. Interessant sind aber die doch relevanten Unterschiede im Sorptionsfeuchtegehalt zwischen den Varianten unterschiedlicher Herstellverfahren.

Die vollständigen Sorptionsisothermen sind sortiert nach Herstellverfahren in Abbildung 51 - Abbildung 53 dargestellt. Im Folgenden werden die Werte verdichtet auf die mittleren Feuchtegehalte (gemittelt aus Adsorption und Desorption) für die typischen Klimata 23°C / 50 % r. F. (23/50) und 23°C / 80 % r. F. (23/80) diskutiert (Abbildung 50).

Die Varianten B1 und B2 zeigen bei 23/50 niedrigere Feuchtegehalte als die Variante B7, die mit den Varianten aus dem Trockenverfahren und den Flex Varianten auf einem ähnlichen Niveau liegt. Differenzierter werden die Unterschiede bei höheren Feuchtegehalten im Klima 23/80. Hier zeigt sich bei der Variante B7 mit ca. 15 -% ein deutlich höheres Niveau des Feuchtgehalts als bei den Varianten B3 und B4 mit ca. 13 m-%. Die mit Abstand höchsten Feuchtegehalte bei 23/80 zeigen die Varianten B5 und B6 mit fast 18 m-%. Dieses Verhalten ist auf die in den Varianten B5 und B6 verwendeten Flammschutzmittel zurückzuführen die hygroskopisch wirken.

Interessante Effekte ergeben sich nun durch die Bezugsfeuchte zur Ermittlung des Nenn- oder Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit. Während im Rahmen der europäischen Produktnormung üblicherweise 23/50 als Bezugsklima herangezogen wird, besteht in Deutschland üblicherweise noch ein Bezug auf 23/80. Je nachdem welches Klima herangezogen wird, ergeben sich für bestimmte Produkte deutliche Unterschiede im Feuchtegehalt (und damit auch in den Feuchtezuschlagsfaktoren).

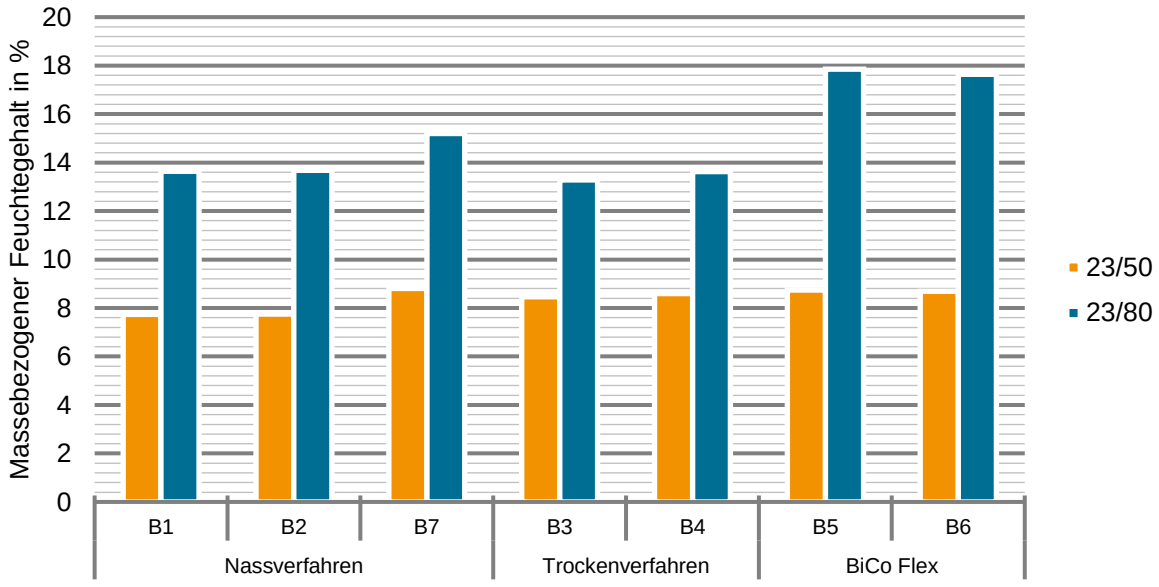


Abbildung 50 Sorptionsfeuchtegehalte bei 23°C / 50 % r. F. und 23°C / 80 % r. F. für die Varianten B1 – B7 (sortiert nach Herstellverfahren)

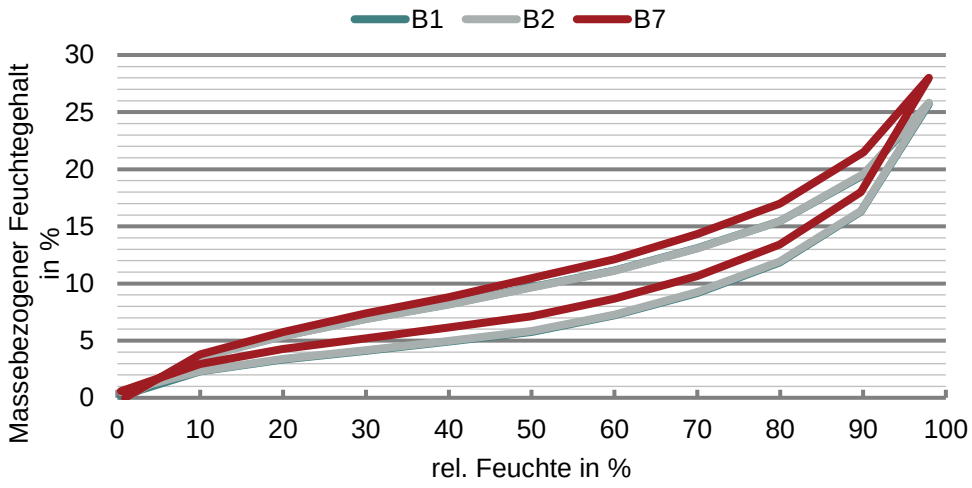


Abbildung 51 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B2 und B4

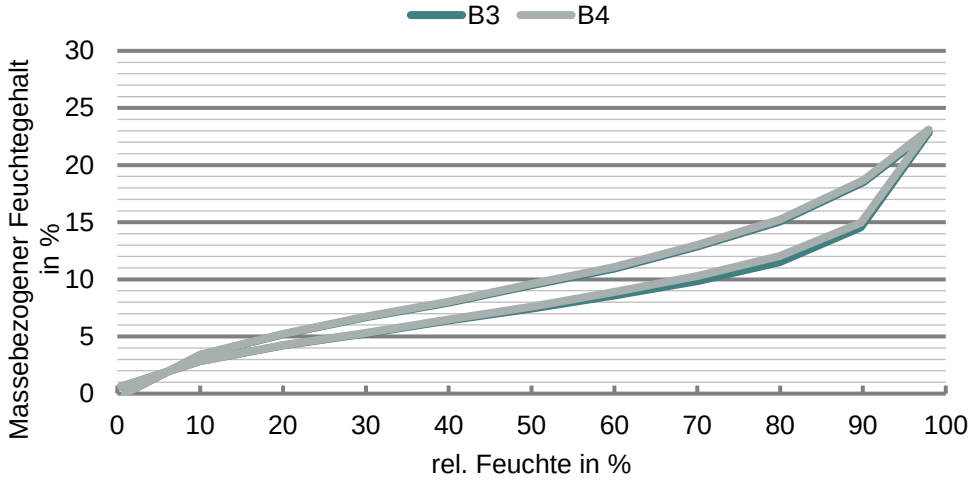


Abbildung 52 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B3 und B4

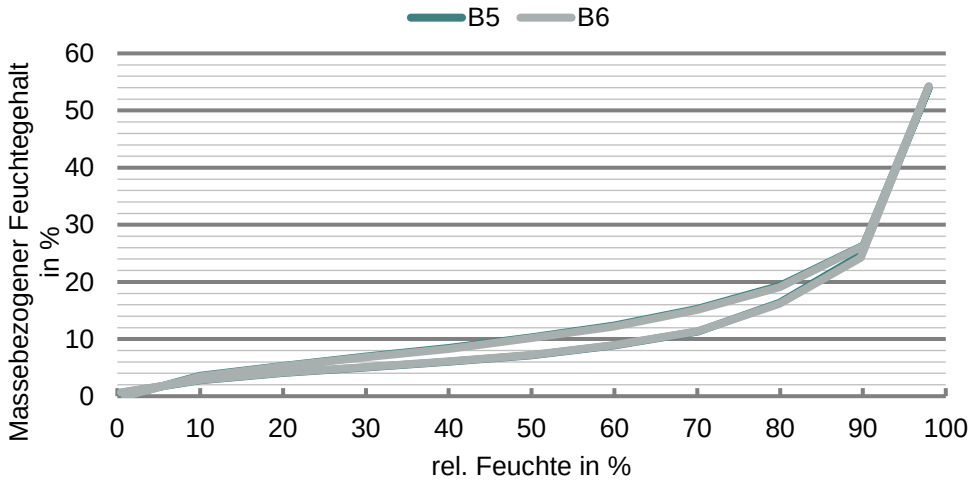


Abbildung 53 Sorptionsisothermen bei 23°C für die Varianten B5 und B6

V.2 µ-CT

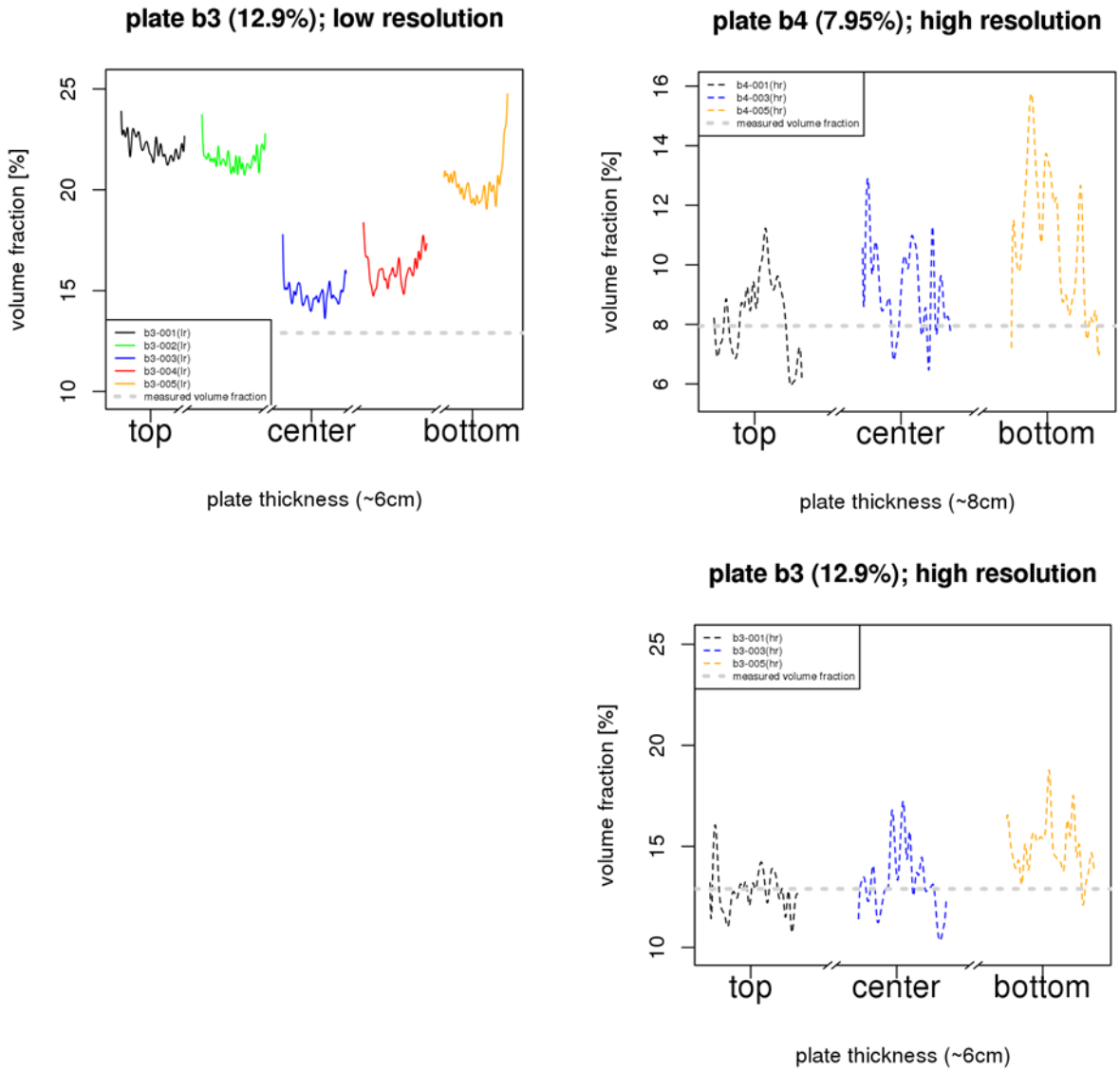


Abbildung 54 Volumenanteile auf Basis der SRµCT-Bilder für Plattenproben B3 und B4. Links: Voxelkantenlänge 3 µm (nur für B3 verfügbar). Rechts: Voxelkantenlänge 650 nm. Aus dem Flächengewicht berechneter Sollwert grau gestrichelt.

Vergleich der Flächendichteprofile ergibt deutlich höhere Volumenanteile für die Datensätze mit Voxelkantenlänge 3 µm. Diese Abweichung ist systematisch und damit nicht dadurch zu erklären, dass die abgebildeten Teilvolumina nicht identisch sind. Die Ursache ist vielmehr, dass die Wände der Zellulosefasern dünn sind und durch den Partialvolumeneffekt bei der tomografischen Abbildung sowie die anschließende Wahl eines Grauwertschwellwerts überschätzt werden. Diese Erklärung wird auch dadurch gestützt, dass die Volumenanteile in den Datensätzen mit 650 nm Voxelkantenlänge sehr gut mit den Volumenanteilen übereinstimmen, die aus dem Flächengewicht berechnet werden.

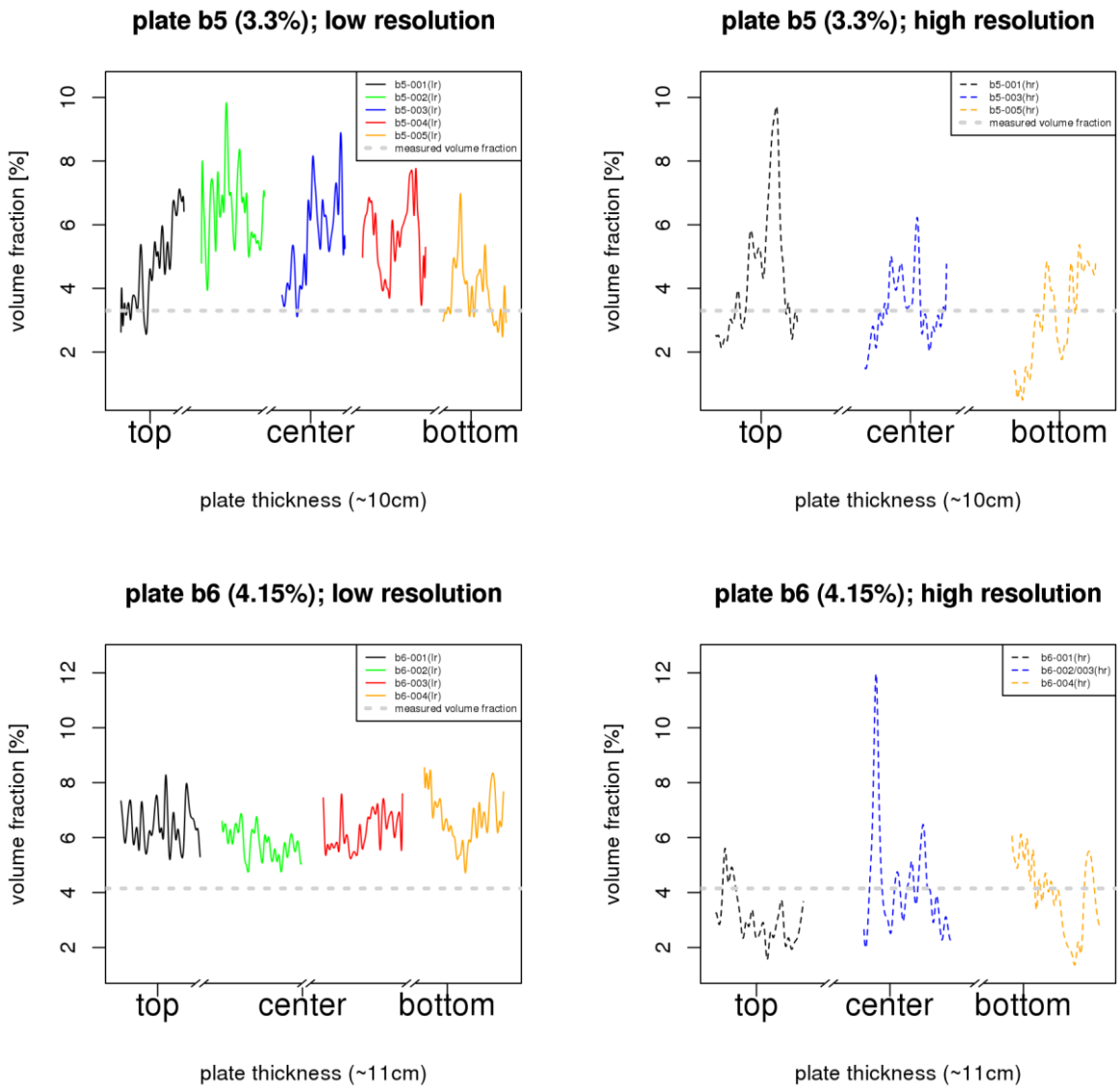


Abbildung 55 Volumenanteile auf Basis der SRµCT-Bilder für Plattenproben B5 und B6. Links: Voxelkantenlänge 3 µm. Rechts: Voxelkantenlänge 650 nm. Aus dem Flächengewicht berechneter Sollwert grau gestrichelt.

Diese hochaufgelösten Datensätze können jedoch z.B. für die Charakterisierung des Porenraums nicht herangezogen werden, weil die abgebildeten Volumina zumindest für den Porenraum zu klein sind, um repräsentativ zu sein. Deshalb mussten alle Datensätze aufwändig verarbeitet und segmentiert werden.

Die Modellierung erfordert die Trennung (Segmentierung) der Mikrostruktur in Fasern, Chips und Brocken. Es wurden diverse Zugänge erprobt, um diese Segmentierungsaufgabe zu lösen:

- Labelling:
  - naiv auf dem Vordergrund scheitert daran, dass sich die Objekte berühren
  - der Lumen scheitert daran, dass diese offen sind
- Morphologische Transformationen: Parameter müssten lokal variiert werden, zudem sind die Lumen dicker als die Abstände zwischen einzelnen Objekten

- Lokale Indizes für Fasrigkeit und Flächigkeit: schwer kombinierbar, zudem ist die Struktur lokal auf der feinsten Skala durchgängig flächig
- Topologische Analyse via Pfadlängenkarte:
    - Karten der kürzesten geodätischen Pfadlängen, jeweils von einer Randscheibe
    - Inneres entweder nicht zugänglich (Zusammenhangsanalyse) oder nur auf großem Umweg (durch Löcher in der Wand)
    - Marker für Inneres: Maximum über Pfadlängenkarten für mehrere Richtungen
    - Nur trennscharf, wenn mehr als die Koordinatenrichtungen genutzt werden, dann aber zu aufwändig.
- Lokale geometrische Kenngrößen:
    - Lokale Messung der Basiskenngrößen Volumen V, Oberflächeninhalt S, Integral der mittleren Krümmung M, Eulerzahl χ
    - Kombination der Basiskenngrößen zu einem lokalen Formindex
        - Structure model index $SMI=VM/S^2$: instabil, da M lokal nahe 0 ist, da die Wände nahezu ungekrümmt sind
        - S/V: erfolgversprechend, siehe Abbildung 56
    - Kachelung muss durch Filter ersetzt werden
    - Größe der Teilvolumina muss optimiert werden

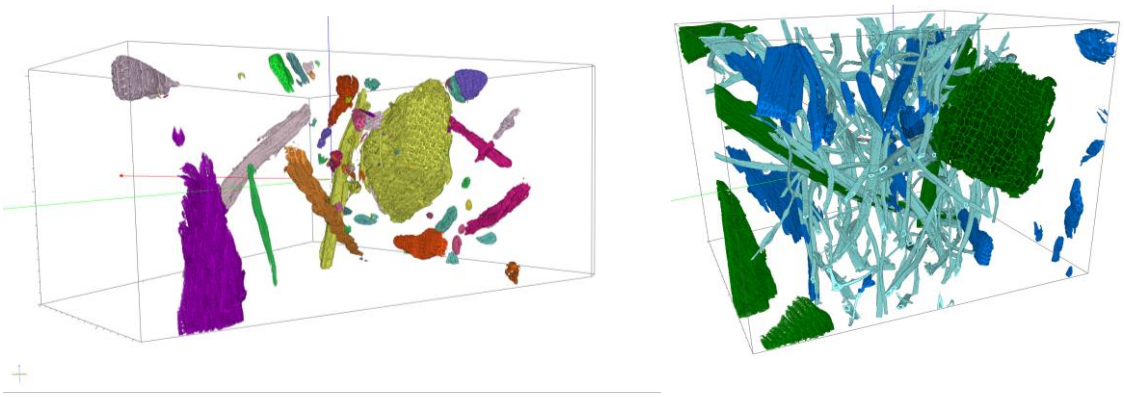


Abbildung 56 Segmentierungsergebnisse mithilfe des lokalen Verhältnisses von S zu V. Farben kodieren Objektnummern (links) bzw. Objekttyp (rechts, hellblau – Fasern, dunkelblau – Chips, grün – Brocken).

Zur Charakterisierung der Struktur auf Basis der binarisierten Bilddaten stehen die gleichen Basiskenngrößen, jedoch bezogen auf das Probenvolumen (die Dichten der inneren Volumina) zur Verfügung. Für den Vergleich der Fasersysteme vor und nach Verarbeitung sind sie jedoch nicht nutzbar, da die Volumendichte in den Faserproben nur von der Probenpräparation bestimmt wird. Der SMI liegt aus den o.g. Gründen nahe 0 und ist kaum interpretierbar.

Interessant ist hingegen auch hier wieder das Verhältnis S/V: Während es bei der Verarbeitung der F3-Fasern zu B3 bzw. B4 sinkt, steigt es für B5 und B6 gegenüber F5 bzw. F7 an, siehe Tabelle 17 und Tabelle 18. Der Anstieg ist gut mit dem Zerfallen von Chips bzw. Brocken in Einzelfasern erklärbar – dabei bleibt das Volumen konstant, die Oberfläche hingegen wächst. Zudem werden beim Übergang von F5 und F7 zu B5 bzw. B6 BiCo-Fasern zugemischt, die einen weiteren Anstieg

verursachen. Ein Sinken von S/V kann durch Verklebung von Fasern und Kollabieren von Lumen erklärt werden.

Tabelle 17 Strukturkenngrößen für Teilvolumina der Größe (1.2mm x 1.2mm x 1.4mm) (F3) , (1.9mm x 1.9mm x 1.5mm) (F5) , (1.8mm x 1.8mm x 1.5mm) (F7) der Faserproben.

Probe	SMI (VM/S²)	S_V [mm^{-1}]	S/V [mm^{-1}]
F3 (-> B3, B4)	0.15	56.98	520.64
F5 (-> B5)	0.10	18.45	416.65
F7 (-> B6)	0.41	37.29	477.19

Tabelle 18 Strukturkenngrößen für Teilvolumina der Größe (1.1mm)³ (B5) bzw. (1.1mm x 1.1mm x 1.4mm) (B3, B4, B6) Plattenproben, angegeben sind maximaler und minimaler Wert.

Probe	SMI (VM/S²)	SV [mm^{-1}]	S/V [mm^{-1}]
B3	-0.33-0.05	66.97-71.33	478.22-523.93
B4	-0.25-0.03	42.09-57.67	473.33-532.45
B5	0.03-0.50	15.48-26.18	521.46-586.67
B6	-0.11-0.43	16.17-22.25	549.25-582.98

VI. Meilenstein 2: Mikrostrukturmodellierung und Multiskalensimulation

VI.1 Physikalische Untersuchungen

Für die Modellierung der Wärmeleitfähigkeit ist es eine entscheidende Frage, welche Wärmetransportmechanismen berücksichtigt werden müssen. Die Wärmeleitung in den Faserstrukturen und über die Kontaktstellen lässt sich in den vorhandenen Modellierungsumgebungen gut beschreiben. Darüber hinaus wirken in porösen Festkörpern wie unter II.1.5 beschrieben noch weitere Wärmeübertragungsmechanismen. Der Einfluss der Konvektion kann unter Berücksichtigung der relativ hohen Strömungswiderstände (Abbildung 38) und bei den im Gebäudebereich zu erwartenden, verhältnismäßig niedrigen Temperaturdifferenzen praktisch ausgeschlossen werden. Gleichwohl können sich in größeren Hohlräumen Konvektionseffekte einstellen, die aber gegenüber den anderen Wegen der Wärmeübertragung vernachlässigt werden können. Relevant ist in jedem Fall der Einfluss der Wärmestrahlung.

VI.1.1 Untersuchung der Anteile der Wärmeübertragung

Um zu klären in welcher Größenordnung die Wärmestrahlung in den Modellen berücksichtigt werden muss und ob eine detaillierte Modellierung nötig ist, wurden die Wärmeübertragungsmechanismen an zwei ausgewählten Dämmstoffen physikalisch untersucht.

Die Untersuchung der Anteile der Wärmeübertragung wurde wie in IV.2.3 beschrieben, an Mustern der Varianten B3 und B7 durchgeführt. Die Auswahl fiel auf B3 und B7, weil die Produkte unterschiedlichen Herstellungsverfahren entstammen, aber eine ähnliche Rohdichte aufweisen (B3 ca. 170 kg/m^3, B7 ca. 164 kg/m^3).

Durch die Auswertung der Messdaten können die Effekte der Wärmestrahlung und Wärmeleitung separiert werden. An flexiblen Produkten (B5 und B6) kann jedoch mit den vorhandenen Mitteln keine Messung der Wärmeleitfähigkeit im evakuierten Zustand durchgeführt werden, weil die Proben nicht druckstabil sind.

Die Messwerte und das Ergebnis der rechnerischen Ermittlung der Anteile der Wärmeübertragung im Feststoff, in der Gasphase und durch Strahlung, zeigt Abbildung 57 für die Variante B3 und Abbildung 58 für die Variante B7.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 59 gegenübergestellt.

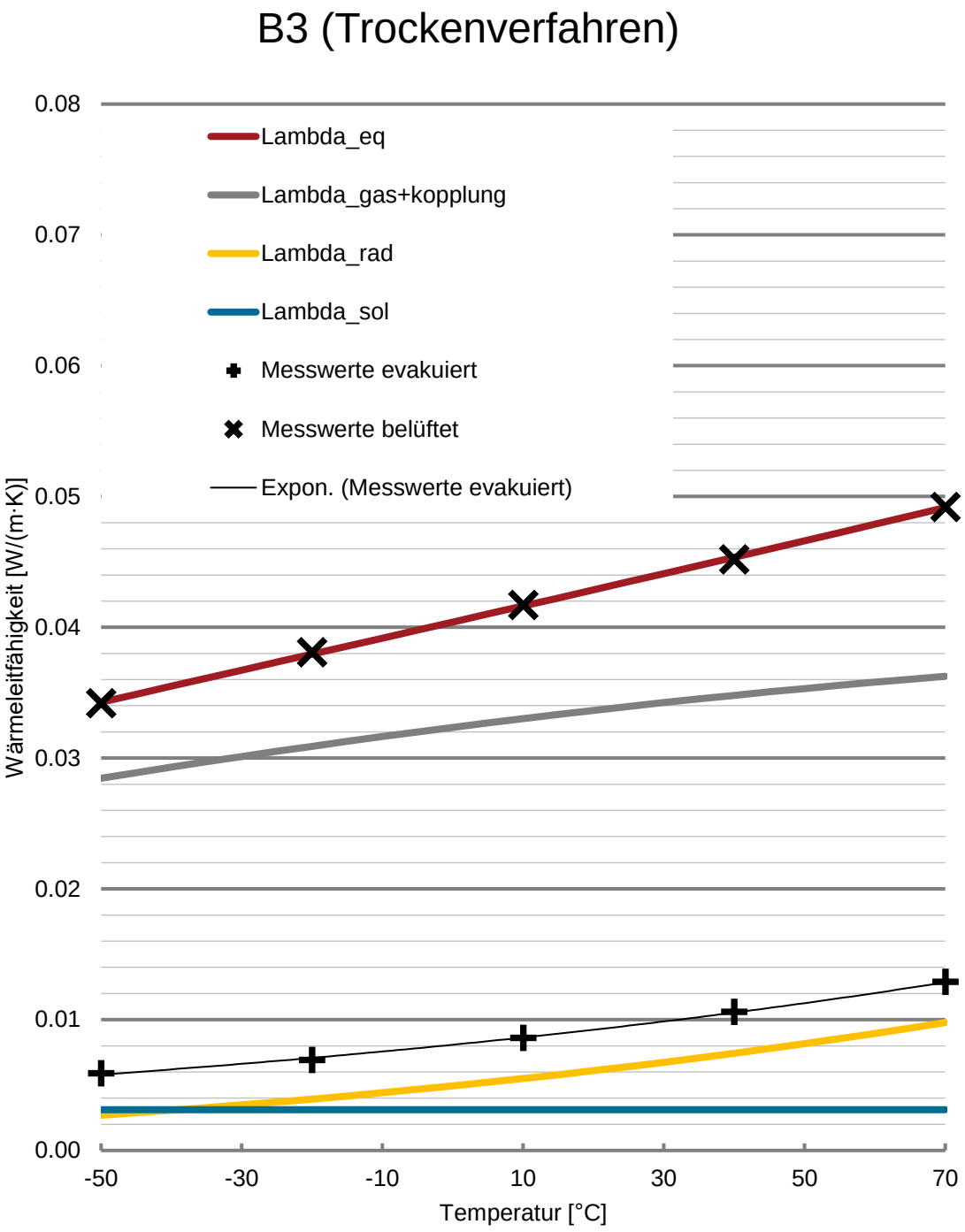


Abbildung 57 Anteile der Wärmeübertragung durch Festkörperwärmeleitfähigkeit, Strahlung und Gaswärmeleitfähigkeit für den Plattentyp B3, Lambda_eq = äquivalente (gemessene) Wärmeleitfähigkeit, Lambda_gas+kopplung = Gaswärmeleitfähigkeit und Kopplungseffekte, Lambda_rad = Anteil der Wärmestrahlung, Lambda_sol = Feststoffwärmeleitfähigkeit

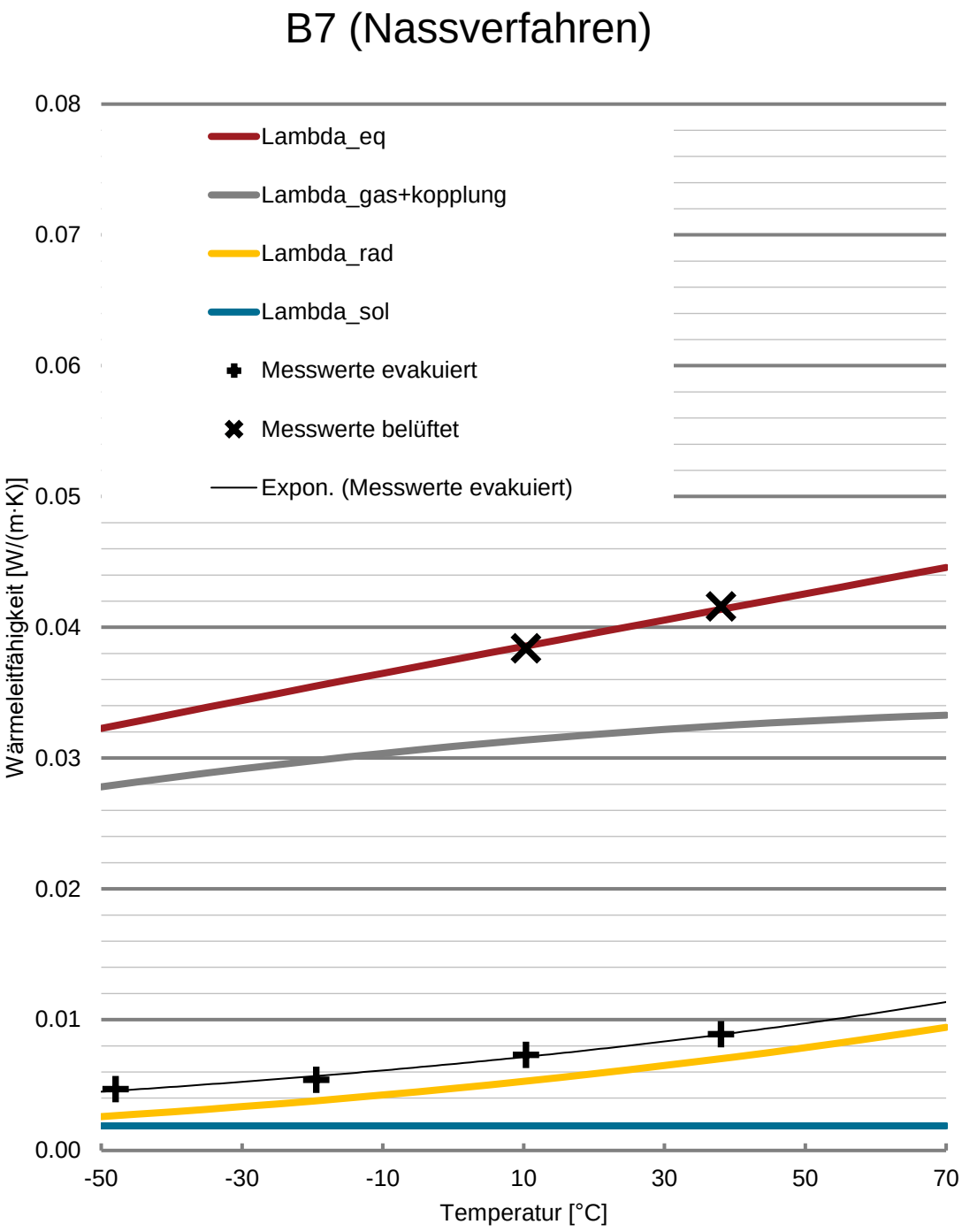


Abbildung 58 Anteile der Wärmeübertragung durch Festkörperwärmeleitfähigkeit, Strahlung und Gaswärmeleitfähigkeit für den Plattentyp B7, Lambda_eq = äquivalente (gemessene) Wärmeleitfähigkeit, Lambda_gas+kopplung = Gaswärmeleitfähigkeit und Kopplungseffekte, Lambda_rad = Anteil der Wärmestrahlung, Lambda_sol = Feststoffwärmeleitfähigkeit

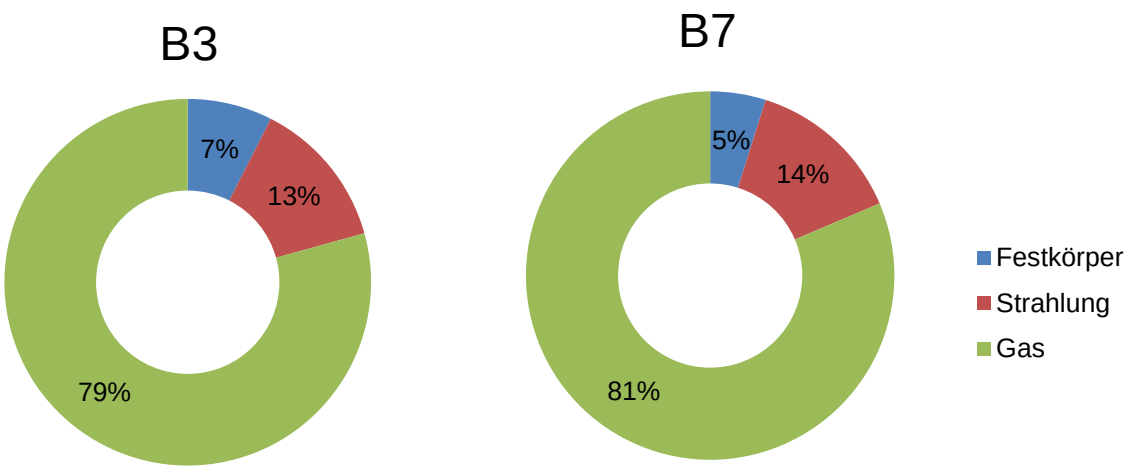


Abbildung 59 Vergleich der Anteile der Wärmeübertragung im Festkörper, in der Gasphase und durch Wärmestrahlung für die Varianten B3 und B7

Für beide untersuchten Varianten zeigen sich ähnliche Anteile der Wärmeübertragungsmechanismen an der effektiven Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 59). Der Anteil der Wärmestrahlung liegt für den Plattentyp B3 bei ca. 13 % und beim Plattentyp B7 bei ca. 14 **%.** Die Festkörperwärmeleitfähigkeit liegt für den Plattentyp B3 mit ca. 7 % etwas höher als beim Plattentyp B7 mit ca. 5 %. Dies könnte auf den verbesserten Faser-Faser-Kontakt durch die Verklebung beim Plattentyp B3 zurückzuführen sein.

Der größte Anteil ist bei beiden Varianten erwartungsgemäß der Anteil der Gaswärmeleitfähigkeit mit ca. 79 % bei Variante B3 und ca. 81 % bei Variante B7.

Die ermittelten Unterschiede im Anteil der Wärmeübertragung durch Strahlung sind zwischen den Varianten B4 und B7 nicht signifikant, obwohl sich beide Varianten hinsichtlich des Faseraufschluss, der Fasergrößen und des Herstellverfahrens sowie der Additive deutlich unterscheiden. Während der Plattentyp B7 im Nassverfahren hergestellt wird und den Partikelverbund fast ausschließlich durch mechanische Verfilzung erhält, sind die Fasern im Plattentyp B4 durch den Einsatz des Bindemittels zumindest teilweise mit PMDI überzogen. Trotzdem bestehen keine Unterschiede im Anteil der Wärmeübertragung.

Interessant wäre die Frage wie sich größere Porenräume zwischen den Partikeln wie diese bei deutlich niedrigeren Rohdichten entstehen, auf den Anteil der Wärmestrahlung auswirken. Dieser Effekt konnte jedoch aufgrund der zu geringen Druckfestigkeit der Produkte B5 und B6 nicht ermittelt werden. Für die Modellierung wird ein pauschaler Zuschlag verwendet, um den ermittelten Anteil der Wärmestrahlung an der Wärmeübertragung in der Größenordnung von 13 – 14 % zu berücksichtigen.

VI.1.2 Untersuchung der optischen Dichte

Die im Folgenden beschriebenen Messungen des Emissionsgrades sollen klären, ob und in welchem Maß der unterschiedliche Faseraufschluss und die unterschiedliche Struktur zwischen den Produkten B4 und B5/B6 die optische Dichte der Fasernetzwerke beeinflusst. Dies ist einerseits wichtig um

abzuschätzen ob die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit ggf. durch direkten Strahlungsaustausch zwischen den Messplatten beeinflusst werden und andererseits kann darauf aufbauend abgeschätzt werden, ob sich Optimierungsstrategien zur Erhöhung der optischen Dichte (z. B. durch die Zugabe von Trübungsmitteln) positiv auswirken können.

Dazu wurden Muster der Produkte B5 und B4 in unterschiedlich dicke Schichtstärken aufgetrennt. Um ggf. Unterschiede zwischen einer Struktur aus der Mittelschicht und dem Randbereich der Probe zu ermitteln, wurde die dünnste Schichtstärke (3 mm) jeweils einmal vom Rand und aus der Mitte der Dämmstoffprobe entnommen. Weitere Schichtstärken waren 5 mm, 10 mm und 15 mm. Als Referenz wurde jeweils der Emissionsgrad der blanken Oberflächen (schwarz lackierte Metallplatte, Aluminiumfolie auf Metallplatte) sowie der Emissionsgrad des Dämmstoffs in voller Stärke (80 – 100 mm) ohne Hinterlegung gemessen.

Das Messgerät (TIR 100) besteht aus einem sphärischen Halbraum, der auf eine Temperatur von 100°C geheizt ist. Die zu messende Oberfläche wird für kurze Zeit der emittierenden Wärmestrahlung des Messgeräts ausgesetzt und die von der Oberfläche des Probekörpers reflektierte Strahlung gemessen. Der Emissionsgrad wird aus dem Vergleich mit Reflexionswerten der Probe mit gespeicherten Referenzwerten zweier kalibrierter Standards ermittelt.

Tabelle 19 enthält die Ergebnisse aus 9 Einzelmessungen bei einer Hinterlegung mit einer schwarz lackierten Metallplatte.

Tabelle 19 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit schwarz lackierter Metallplatte

Nur schwarz lackierte Metallplatte	0.918	
	Flex	Therm
3 mm Dämmstoff auf Schwarz	0.784	0.786
3 mm Dämmstoff (Rand) auf Schwarz	0.817	0.796
5 mm Dämmstoff auf Schwarz	0.774	0.780
10 mm Dämmstoff auf Schwarz	0.789	0.783
15 mm Dämmstoff auf Schwarz	0.777	
Nur Dämmstoff (volle Dicke ohne Hinterlegung)	0.803	0.828

Die schwarz lackierte Metallplatte weist einen Emissionsgrad von 0.918 auf. Die Probe B5 hat in voller Dicke ohne Hinterlegung einen Emissionsgrad von 0.803 und die Probe B4 einen Emissionsgrad von 0.828.

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse nochmal graphisch aufbereitet. Interessanterweise ist der Emissionsgrad der Dämmstoffschichten mit Hinterlegung insgesamt auf einem etwas niedrigeren Niveau als der Emissionsgrad des Dämmstoffs und der Hinterlegung für sich. Im Vergleich der unterschiedlichen Schichtstärken zeigt sich jedoch kein Einfluss der Schichtdicke auf den Emissionsgrad. Auch die bei Messung der Dämmstoffe ohne Hinterlegung erkennbaren geringen Unterschiede zwischen den beiden Dämmstoffen sind bei Messung mit Hinterlegung nicht mehr zu erkennen.

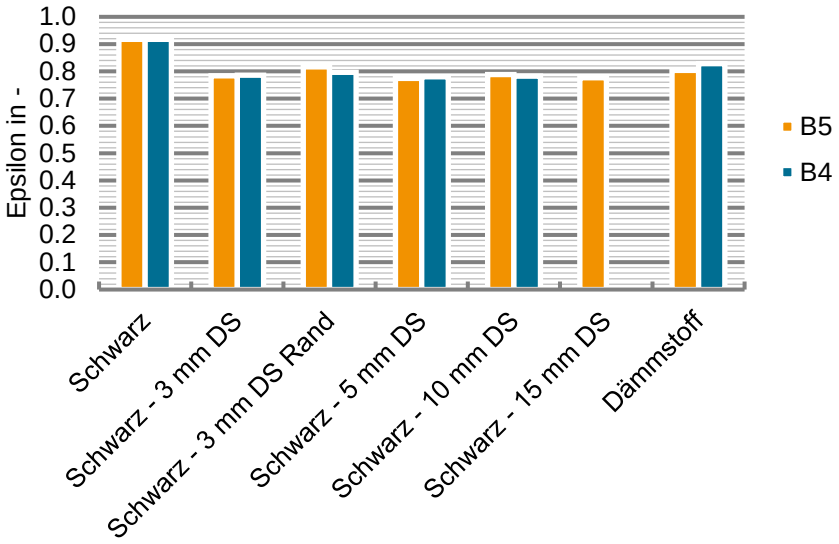


Abbildung 60 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit schwarz lackierter Metallplatte

Tabelle 20 und Abbildung 61 zeigen die Ergebnisse für die Hinterlegung mit Aluminiumfolie. Die Aluminiumfolie hat mit einem Emissionsgrad von 0.006. Gegenüber der schwarz lackierten Metallplatte also ein stark reflektierendes Verhalten. Bereits bei einer Überdeckung mit 3 mm Dämmstoff werden jedoch praktisch die gleichen Werte erreicht wie bei der Hinterlegung mit der schwarz lackierten Metallplatte.

Tabelle 20 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit Aluminiumfolie auf Metallplatte

Nur Alu	0.006	
	Flex	Therm
3 mm Dämmstoff auf Alu	0.785	0.769
3 mm Dämmstoff (Rand) auf Alu	0.787	0.800
5 mm Dämmstoff auf Alu	0.783	0.765
10 mm Dämmstoff auf Alu	0.780	0.781
15 mm Dämmstoff auf Alu	0.765	
Nur Dämmstoff (volle Dicke ohne Hinterlegung)	0.803	0.828

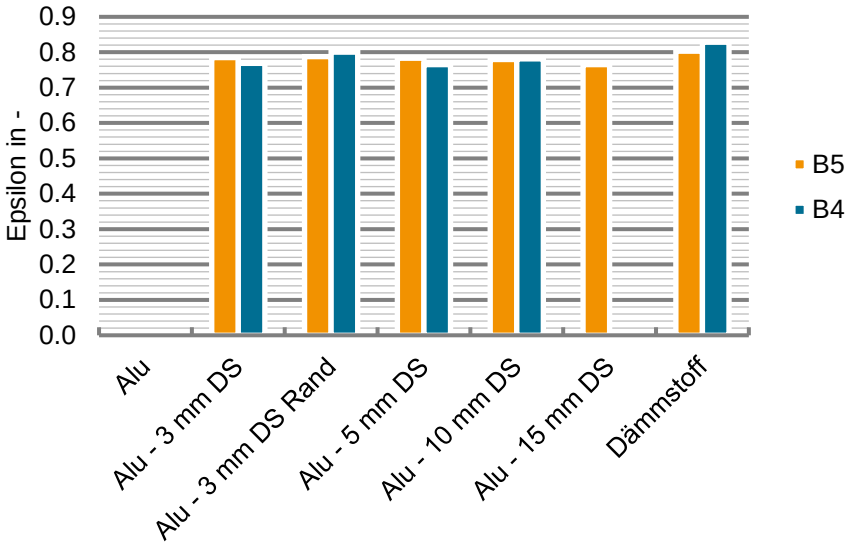


Abbildung 61 Emissionsgrad für unterschiedliche Dämmstoffstärken hinterlegt mit Aluminiumfolie auf Metallplatte

Die Ergebnisse legen nahe, dass eine Transmission von Wärmestrahlung durch den Dämmstoff hindurch bereits bei sehr geringen Schichtdicken durch die hohe Opazität des Dämmstoffs vermieden wird. Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit bedeutet dies, dass das Messergebnis nicht von einer Transmission der Wärmestrahlung zwischen den Messplatten beeinflusst wird. Der Anteil der Wärmestrahlung an der Wärmeübertragung in einer Größenordnung von 13 – 14 % wie an den Produkten B3 und B7 ermittelt wirkt aufgrund des Strahlungsaustauschs zwischen den Einzelpartikeln und kann damit durch einen pauschalen Zuschlag in der Simulation abgebildet werden.

Im Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass denkbare Optimierungsansätze durch Zugabe von Trübungsmitteln wie diese bei EPS und Aerogelen sinnvoll sein können, für Holzfaserdämmstoffe vermutlich ohne Effekt bleiben.

VI.2 Mikrostrukturmodellierung

Der Einfluss der Rohdichte sowie der Anteil von Faserbündeln auf die effektive Wärmeleitfähigkeit wurden an Modellstrukturen numerisch untersucht. Dazu wurde eine Struktur S1 ohne Faserbündel, sowie eine Struktur S2 mit 20% Faserbündeln mit einem Rohgewicht von 150 kg/m^3 erstellt, siehe Abbildung 62.

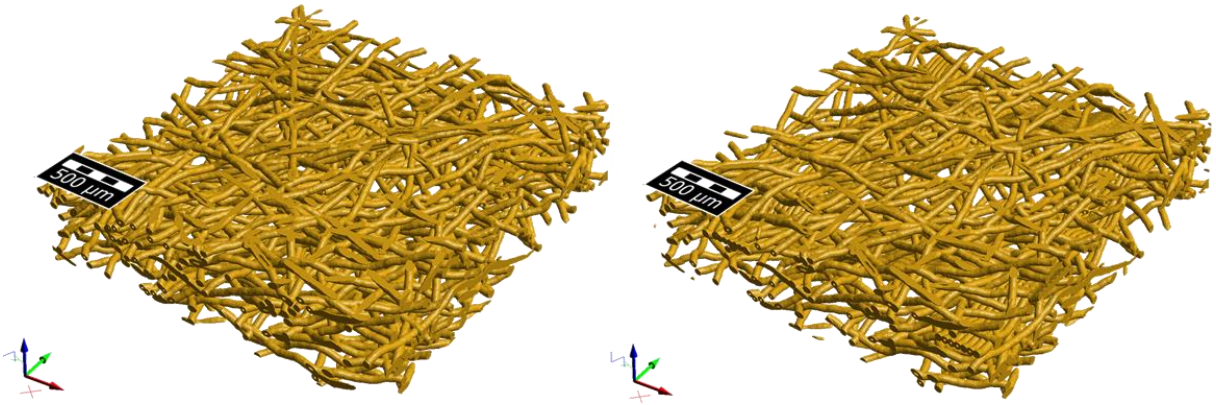


Abbildung 62 Modellstrukturen, links S1 ohne Faserbündel, rechts S2 mit 20% Faserbündeln

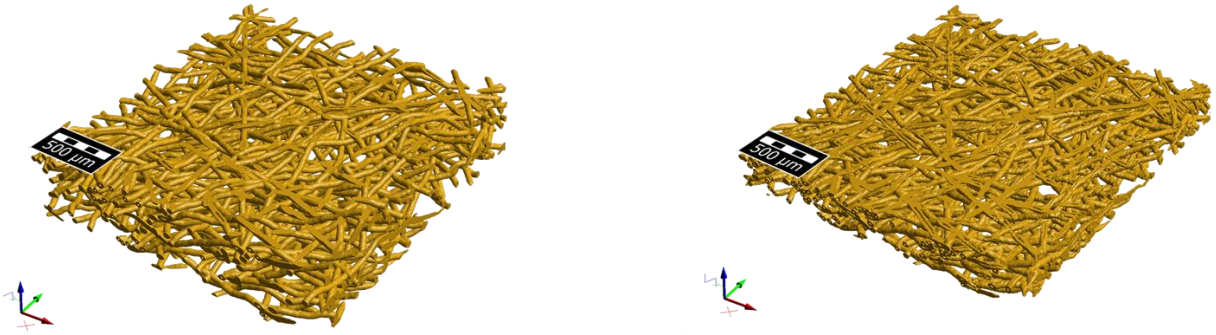


Abbildung 63 Modellstruktur S1, links Original Rohdichte, rechts verpresst

Die beiden dargestellten Ausgangsstrukturen wurden virtuell verpresst (Es wurde eine Kompression numerisch simuliert.), um die Rohdichte schrittweise auf 260 kg/m^3 zu erhöhen. Die Originalstruktur S1, sowie die verpressten Struktur S2 sind in Abbildung 63 dargestellt.

Auf Basis der so im Computer generierten Strukturen wird die effektive anisotrope Wärmeleitfähigkeit und die effektive anisotrope elastische Steifigkeit simuliert (unter Verwendung der Software GeoDict [GeoDict 2021]). Dazu werden zunächst in den Volumenelementen mit den Strukturen S1 und S2 die 3D Wärmeleitgleichungen für gegebene Temperaturdifferenzen in drei Raumrichtungen gelöst. Danach werden über Volumenmittelungen die effektiven Wärmeleitfähigkeiten bestimmt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit ist ein symmetrischer Tensor 2. Stufe.

Die berechneten Werte sind die Hauptdiagonalelemente dieses Tensors. Die Steifigkeiten in den drei Raumrichtungen werden über eine virtuelle Kompression bestimmt. Dazu müssen entsprechende Randwertprobleme der linearen Elastostatik gelöst werden. Wie bei der Wärmeleitung ergeben sich die effektiven Steifigkeiten aus Volumenmittelungen.

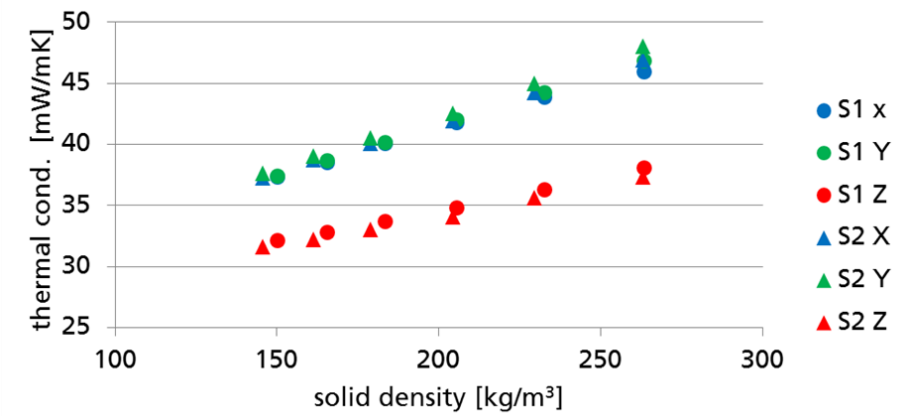


Abbildung 64 Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln

Das Ergebnis der Studie ist, dass die Wärmeleitfähigkeit sehr stark von der Rohdichte, jedoch kaum vom Vorhandensein von Faserbündel abhängt, siehe Abbildung 64. Dahingegen hängt die Steifigkeit in Dickenrichtung sowohl von der Anzahl der Faserbündel als auch vom Faservolumenanteil stark ab (siehe Abbildung 65). Die Steifigkeit der Strukturen ist sehr stark anisotrop, in Dickenrichtung ist die Steifigkeit aufgrund der Faserorientierung deutlich geringer.

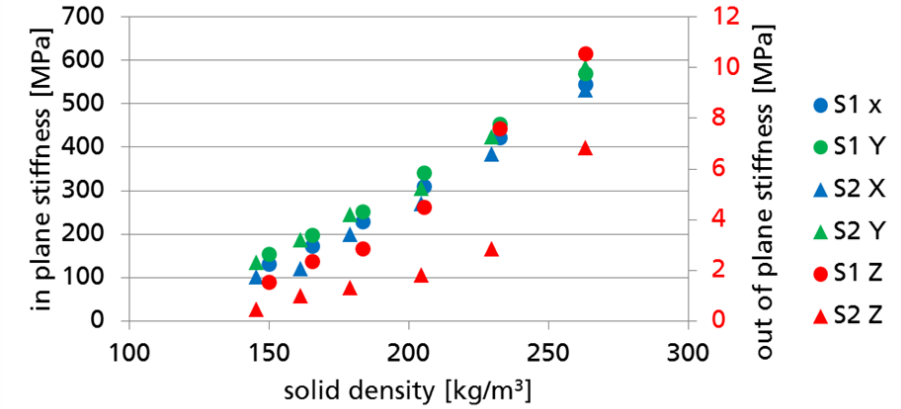


Abbildung 65 Einfluss der Rohdichte auf die Steifigkeit für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln

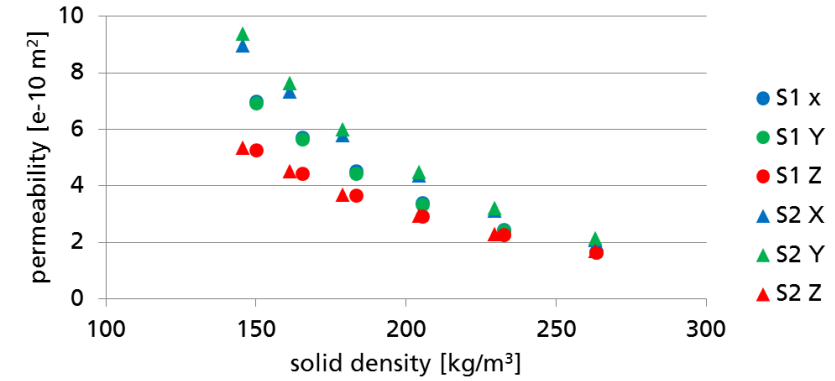


Abbildung 66 Einfluss der Rohdichte auf die effektive Permeabilität für Struktur S1 ohne Faserbündel und Struktur S2 mit Faserbündeln

Die Studie bezüglich des Einflusses der Rohdichte und der Faserbündel wird vervollständigt durch die Betrachtung der effektiven Permeabilität. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 66 dargestellt. Es wurde beobachtet, dass für beide Strukturen und alle Raumrichtungen die Permeabilität mit steigender Rohdichte wie erwartet abnimmt. Eine Anisotropie wird für kleine Rohdichten beobachtet, welche dann mit steigender Verpressung verschwindet. Die Faserbündel haben lediglich einen geringen Einfluss auf die in-plane Permeabilität bei niedrigen Dichten.

VI.3 Multiskalensimulation

Basierend auf den hochaufgelösten Synchrotron-Aufnahmen der Proben B3 und B4 aus wurden Wärmeleitfähigkeitssimulationen auf Ausschnitten dieser Aufnahmen durchgeführt und mit den Messergebnissen aus AP2 verglichen, siehe Abbildung 67 und Abbildung 68, linke Seite.

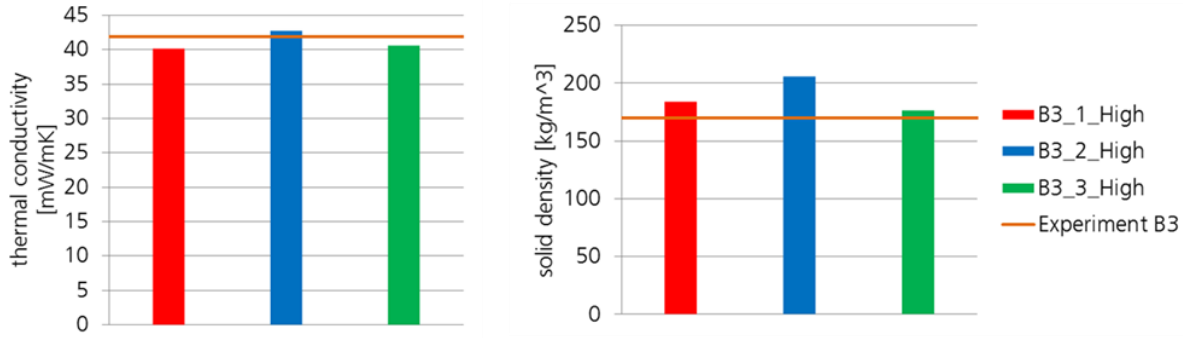


Abbildung 67 Vergleich von simulierten und gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für Probe B3 und Vergleich von Rohdichten

Als Input für die Mikrostruktursimulation werden die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten, hier Luft (W_{Luft} =26 mW/mK) und Zellulosefasern (W_{Faser} =380 mW/mK), benötigt. Für die Bestimmung der Rohdichten wurde für die Zellulosefasern 1380 kg/m^3 zugrunde gelegt.

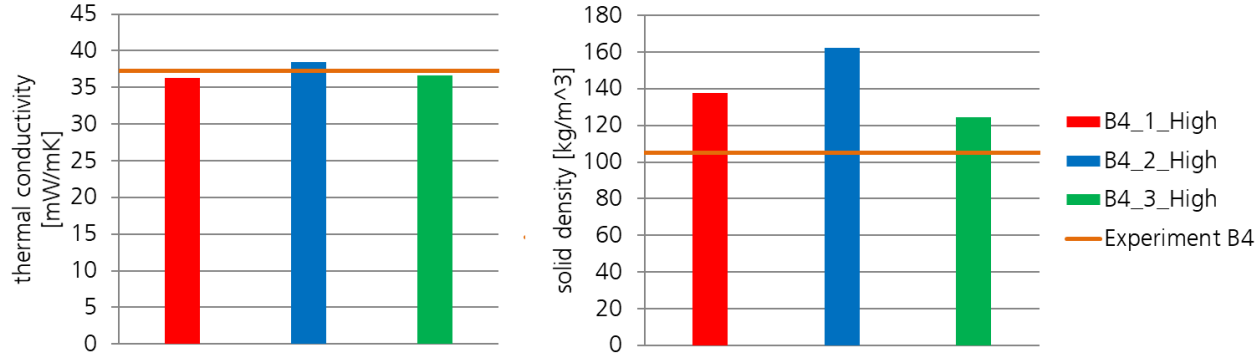


Abbildung 68 Vergleich von simulierten und gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für Probe B4 und Vergleich von Rohdichten

Die komplette Plattendicke wurde für die jeweiligen Proben in drei Abschnitten gescannt. Diese drei Proben sind jeweils nach der Plattennummer (B3 bzw. B4) angegeben. Zur Durchführung der Simulationen wurden die Aufnahmen B3_1, B3_2 und B3_3 sowie B4_1, B4_2 und B4_3 jeweils in 8 gleichgroße Teilvolumina geschnitten und die simulierte Wärmeleitfähigkeit über die jeweiligen Teilvolumina gemittelt. Durch diese Zerlegung werden pro Synchrotronprobe 8 Simulationen auf Ausschnitten der Größe 900x900x1080 Voxel berechnet anstatt einer Simulation auf einem Ausschnitt

der Größe 1800x1800x2160. Durch dieses Vorgehen werden sowohl die Rechenzeit als auch der Speicherplatzbedarf drastisch verringert. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationen auf den Teilabschnitten über der jeweiligen Rohdichte sind in Abbildung 69 und Abbildung 70 dargestellt. Hier ist bereits der Einfluss der Rohdichte auf die simulierte effektive Wärmeleitfähigkeit zu erkennen. Dieser Einfluss wird später anhand einer Modellstruktur genauer untersucht.

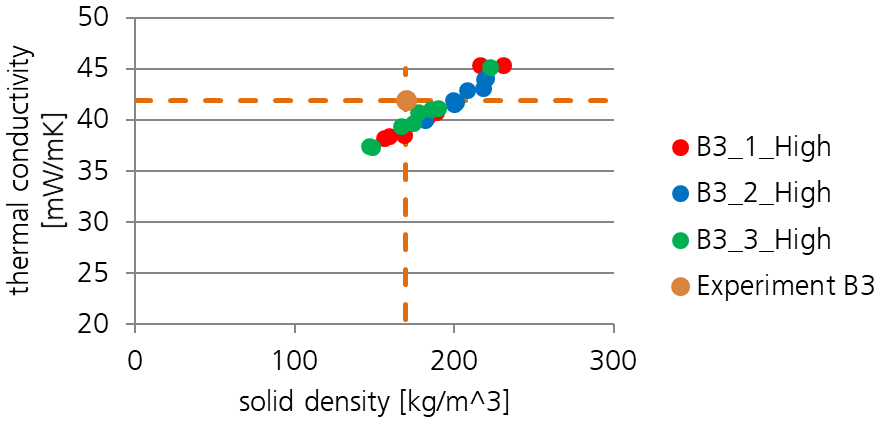


Abbildung 69 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten aus Experiment und den simulierten Teilvolumina Platte B3

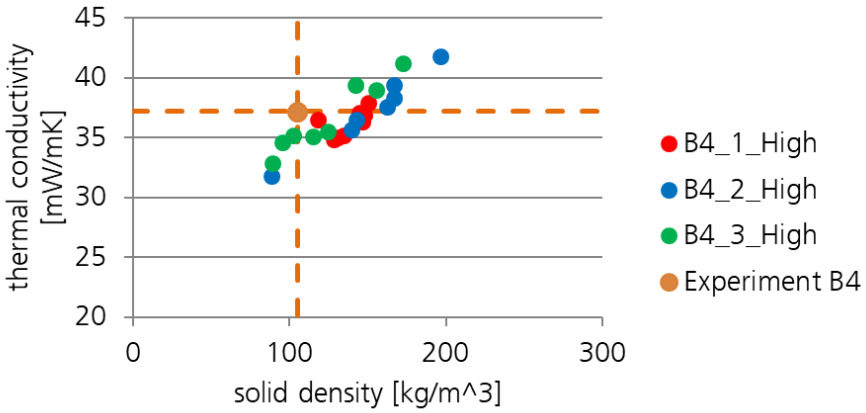


Abbildung 70 Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten aus Experimenten und den simulierten Teilvolumina Platte B4

In Abbildung 71 sind ein Teilvolumen sowie die gesamte betrachte Probe B3_1 visualisiert. Die Ergebnisse bezüglich der Wärmeleitsimulation für die Proben B3 und B4 zeigen gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen vom FIW, siehe Abbildung 67 und Abbildung 68 jeweils linke Seite.

Zur detaillierten Interpretation der Simulationsergebnisse muss die Rohdichte der zugrundeliegenden Strukturen berücksichtigt werden. Obwohl die Ergebnisse für die Wärmeleitung gut übereinstimmen, wird bei der Segmentierung der Synchrotronaufnahmen die Rohdichte überschätzt, siehe rechte Seite von Abbildung 67 und Abbildung 68. Diese Überschätzung ist auf den sogenannten „Partial-Volume Effekt“ zurückzuführen. Würde in den simulierten Strukturen die Rohdichte mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen, dann würde die Wärmeleitfähigkeit sinken. Diese Unterschätzung der Wärmeleitfähigkeit durch die Simulation erklärt sich dadurch, dass in der Simulation nur die reine

Wärmeleitung berücksichtigt wird, jedoch in den Experimenten (und in der Praxis) auch Wärmestrahlungseffekte zum Tragen kommen.

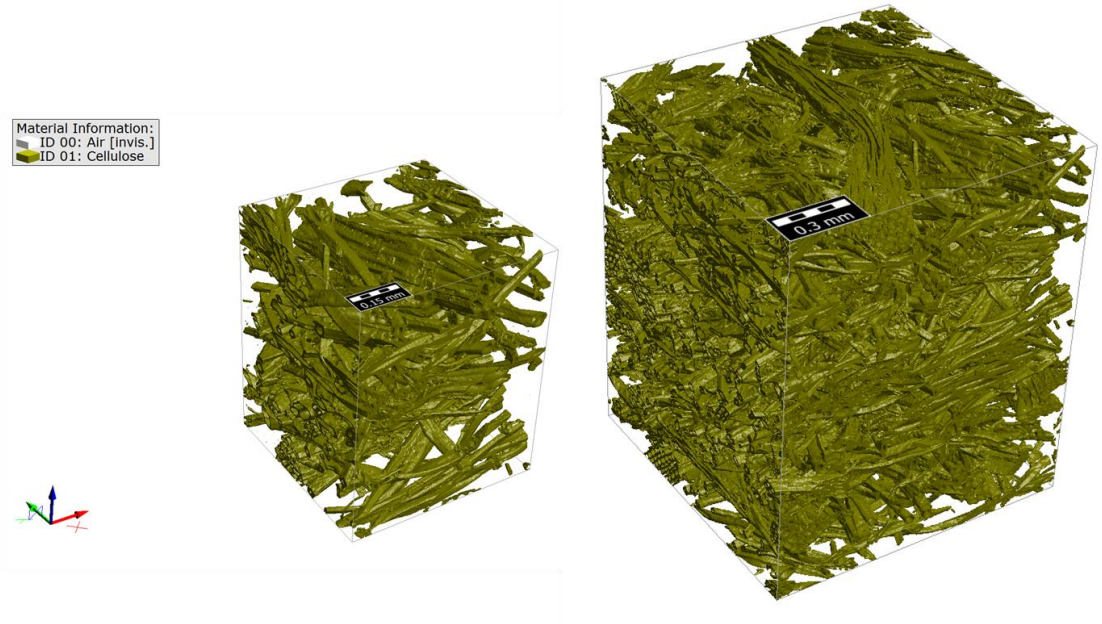


Abbildung 71 Visualisierung der Inputgeometrie für Simulation der Probe B3_1, links Teilvolumen, rechts Gesamtstruktur

VII. Meilenstein 3: Modellvalidierung

Die Modellvalidierung erfolgte anhand der erweiterten Untersuchung der Mikrostruktur und Simulation der Wärmeleitfähigkeit an ausgewählten Proben.

VII.1 Mikrostrukturuntersuchungen und Simulation der Wärmeleitfähigkeit an Probe 83/85

Um die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Mikrostruktur näher zu untersuchen, wurden an ausgewählten Proben mit auffällig hoher bzw. niedriger Wärmeleitfähigkeit weiterführende Auswertungen vorgenommen. Hierzu wurden zwei flexible Matten (entsprechend B5 / B6) ausgewählt. Von beiden Varianten lag jeweils eine Doppelprobe vor, d. h. zwei Matten mit jeweils 500 x 500 x 120 [mm] die direkt benachbart entnommen wurden.

VII.1.1 Physikalische Charakterisierung

Zunächst wurde an einer Probe die Wärmeleitfähigkeit im Messplattenverfahren bestimmt. Das Ergebnis der Wärmeleitfähigkeit, die Rohdichte sowie die Messdaten zur Temperaturdifferenz an unterschiedlichen Positionen sind in Tabelle 21 enthalten.

Tabelle 21 Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Flex Matten mit hoher/niedriger Wärmeleitfähigkeit, Messdaten zur Temperaturdifferenz an unterschiedlichen Punkten und die Wärmeströme für Kaltseite und Warmseite

		Niedrige Wärmeleitfähigkeit		Hohe Wärmeleitfähigkeit	
Proben-Nr.	-	**83/1-2**		**85/1-1**	
Dicke	in mm	**120**		**120**	
Rohdichte	in kg/m³	**55.2**		**47.8**	
Wärmeleitfähigkeit	in W/(m K)	**0.0367**		**0.0392**	
			ΔT in K		**ΔT in K**
WS 1	[°C]	17.55	**14.72**	17.53	**14.71**
KS 1	[°C]	2.83		2.82	
WS 2	[°C]	17.53	**14.70**	17.5	**14.68**
KS 2	[°C]	2.83		2.82	
WS 3	[°C]	17.53	**14.73**	17.51	**14.71**
KS 3	[°C]	2.8		2.8	
WS 4	[°C]	17.55	**14.77**	17.51	**14.74**
KS 4	[°C]	2.78		2.77	
WS 5	[°C]	17.52	**14.69**	17.51	**14.7**
KS 5	[°C]	2.83		2.81	
			Q_{mittel}		**Q_{mittel}**
Q_WS	W/m2	4.458	**4.503**	4.793	**4.813**
Q_KS	W/m2	4.548		4.833	

Die Unterschiede zwischen den Temperaturdifferenzen an den über die Probenfläche verteilten Messstellen sind gering. Bei Bezug auf den mittleren Wärmestrom ergibt die gemessene Variation der lokalen Temperaturdifferenz eine Variation der lokalen Wärmeleitfähigkeit von 0.1 mW/(m K). Einschränkend muss bedacht werden, dass die gemessene lokale Temperaturdifferenz jedoch auch von Querleitungseffekten in der Folienumhüllung bzw. in den Messplatten verschmiert werden kann.

Aus jeder Probe wurden Muster für µ-CT Aufnahmen entnommen, um die Struktureinflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zwischen den Proben 83 und 85 aufzuklären. Die µ-CT Proben wurden jeweils an den Stellen präpariert, an denen bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit die Temperaturdifferenz mittels Thermoelemente bestimmt wurde (Abbildung 72). Dabei wurden Proben mit unterschiedlicher Kantenlänge (40 x 40 x 120 [mm], 15 x 15 x 120 [mm]) vorbereitet, um für unterschiedlich hohe Auflösungen geeignete Probenmaße bereitzustellen.

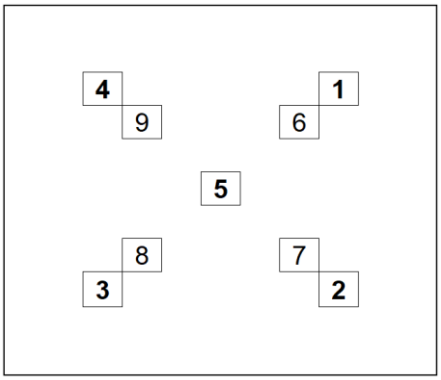


Abbildung 72 Positionen der Probenentnahme für die µ-CT Untersuchungen, Probe 1 – 5: 40 x 40 x 120 [mm], Probe 6 – 9: 15 x 15 x 120 [mm] (L x B x D)

Um ggf. einen Einfluss der Wärmestrahlung auf die unterschiedlichen Ergebnisse qualitativ zu erfassen, wurde an den beiden anderen Mustern auch die Wärmeleitfähigkeit in einem erweiterten Temperaturbereich von ca. -20°C bis 70°C gemessen. Diese Untersuchung wurde in einem Zweiplattenapparat durchgeführt. Die jeweils zweite Probe wurde hierzu in der Mitte geslict. Beide Hälften wurden symmetrisch in das Gerät eingebaut. Die Heizplatte lag jeweils in der Mitte und die zwei Kühlplatten auf den Probenaußenseiten.

Die Ergebnisse zeigen Tabelle 22 und Abbildung 73. Wie zu erwarten zeigt sich bei beiden Proben ein progressiver Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Probenmitteltemperatur. Dieses Verhalten ist auf den Strahlungsanteil bei der Wärmeübertragung zurückzuführen, der mit der dritten Potenz zur Temperatur eingeht. Ein Vergleich der bei 10°C im MPV ermittelten Werte mit den im ZPV ermittelten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Messverfahren (Abbildung 73).

Tabelle 22 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Matten mit hoher (Probe 85) und niedriger (Probe 83) Wärmeleitfähigkeit in einem erweiterten Temperaturbereich

83/1-1		**85/1-2**	
T_m	λ	T_m	λ
in °C	in mW/(m K)	in °C	in mW/(m K)
-20.6	32.8	-21.4	34.1
10.2	37.0	10.4	39.3
39.1	41.4	39.8	44.7
70.1	47.9	69.5	52.0

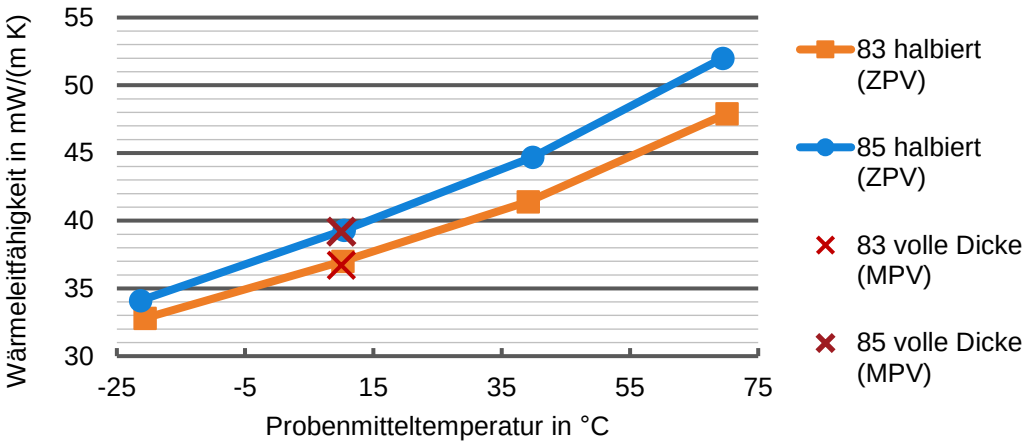


Abbildung 73 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Matten mit hoher (Probe 85) und niedriger (Probe 83) Wärmeleitfähigkeit in einem erweiterten Temperaturbereich

VII.1.2 µCT-Abbildung und qualitative Mikrostrukturanalyse

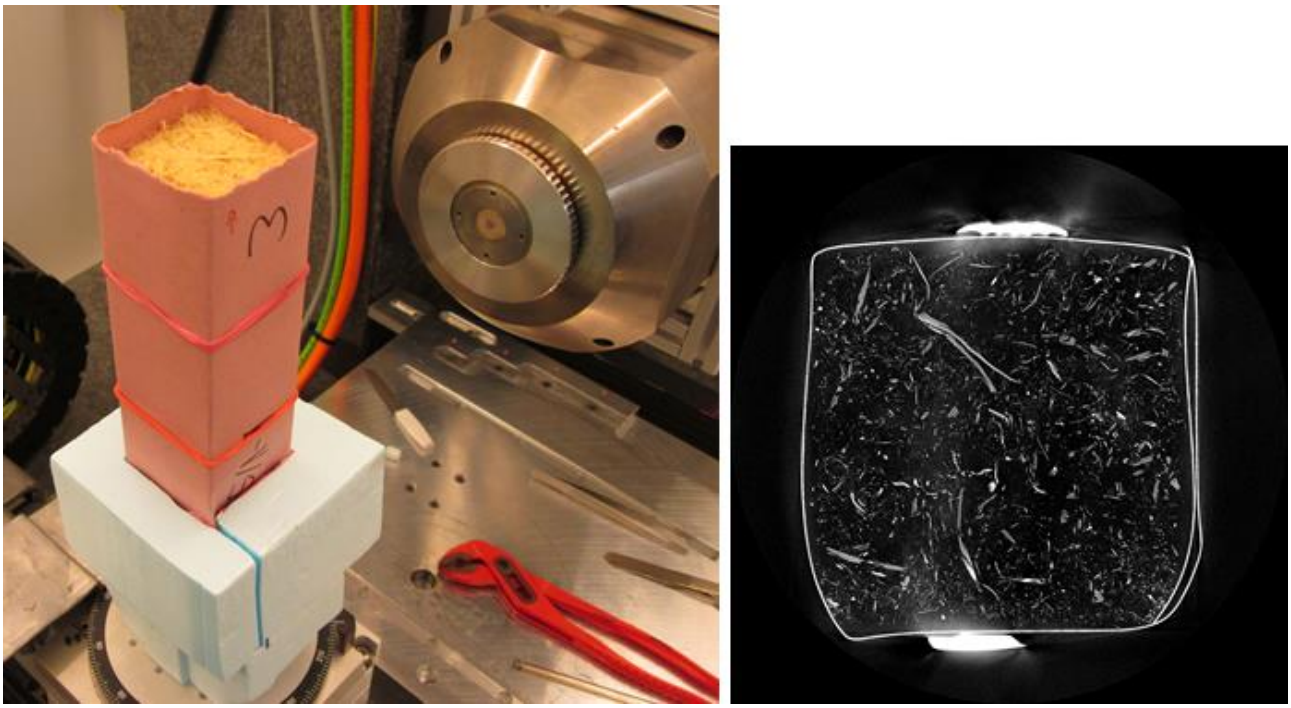


Abbildung 74 Links: µCT Messung am ITWM. Rechts: 2D Schnittbild durch Original-3D-Grauwertbild der Probe links.

Zunächst wurden die Proben 1-5 gescannt, mit je 3 Scans pro Probe wurde die gesamte Plattendicke mit 30.3µm Voxelkantenlänge abgebildet. Diese Voxelkantenlänge ist für die Auflösung sowohl der Zellulosewände als auch der Lumen grenzwertig, so dass die Segmentierung der festen Komponente stark vom Teilvolumeneffekt beeinträchtigt ist. D.h. viele Voxel haben einen Grauwert zwischen dem der festen Komponente und dem des Porenraums. Aus den gemessenen Flächengewichten ergeben sich theoretische Volumenanteile von 3.86% für Platte 83 (gut) und 3.34% für Platte 85 (schlecht). Binarisierung der CT-Bilder führt zu deutlich höheren Werten. Deshalb wurden auch die Proben 6-9

mit Voxelkantenlänge 12.6µm 3D abgebildet. Auf Basis der Bilddaten für Position 9, wieder jeweils 3 Scans (unten, mitte, oben) ergab sich folgendes Bild:.

- Flächendichteprofil über die Dicke: 85 – unten deutlich dichter als oben und mitte, 83 – keine erkennbare systematische Änderung

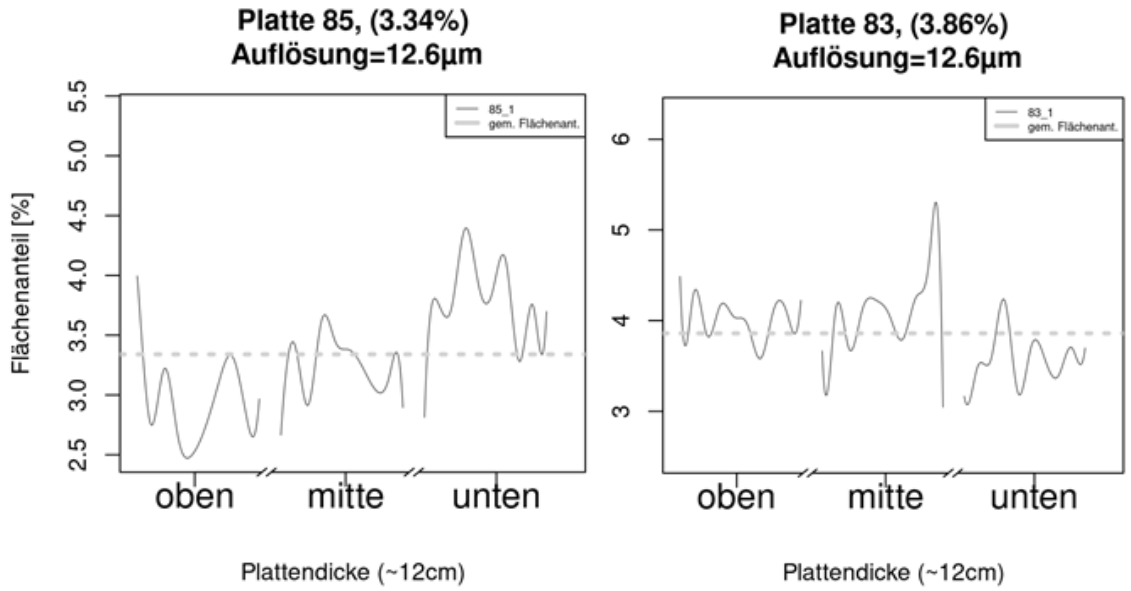


Abbildung 75 Flächendichteprofile über die Plattendicke.

- Anisotropie gemessen anhand der Orientierung der Oberflächennormalen:
  - Verallgemeinerte Projektionen p_S (Mehrfachzählung) des Oberflächeninhalts messen die Oberfläche der festen Komponente mit Normalenrichtung in dieser (diskreten) Richtung. Hier betrachtet wurden die drei Koordinatenrichtungen x, y, z, wobei z die Plattendickenrichtung ist.
  - Die Strukturoberfläche ist überwiegend in xy-Ebene orientiert: $p_{S,z} > p_{S,x}$ und $p_{S,z} > p_{S,y}$,
  - 83 ist etwas stärker ausgerichtet als 85.
- Porenraumanalyse anhand der sphärischen Kontaktverteilung:
  - Verteilung des Abstands des “typischen Punkts” im Porenraum zur festen Komponente.
  - Deutlich größere Poren in 85, siehe Abbildung 76
  - Blau - oben, grün - mitte, gelb – unten. Mittelwerte: 85 - 94µm, 83 – 72µm.
- Geometrische Tortuosität (nur Position 9, Voxelkantenlänge 12.6µm):
  - Länge der kürzesten Wege im Material im Verhältnis zur Probenkantenlänge
  - 85: unten 2.6, mitte 2.7, oben 2.1; 83: unten 2.6, mitte 2.8, oben 2.4
  - 83 ist also deutlich verwundener als 85, was die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit erklären würde

Tabelle 23 Anisotropie der Struktur anhand der Oberflächennormalenrichtungen.

		85/1-1 mit 47.8 kg/m³, hohe Wärmeleitfähigkeit			83/1-2 mit 55.2 kg/m³, geringe Wärmeleitfähigkeit		
Position		9			9		
Scan		Oben	Mitte	Unten	Oben	Mitte	Unten
Verhältnis	$p_{S,z}/p_{S,x}$	1.21	1.33	1.39	1.28	1.33	1.28
	$p_{S,z}/p_{S,y}$	1.30	1.34	1.35	1.42	1.43	1.39

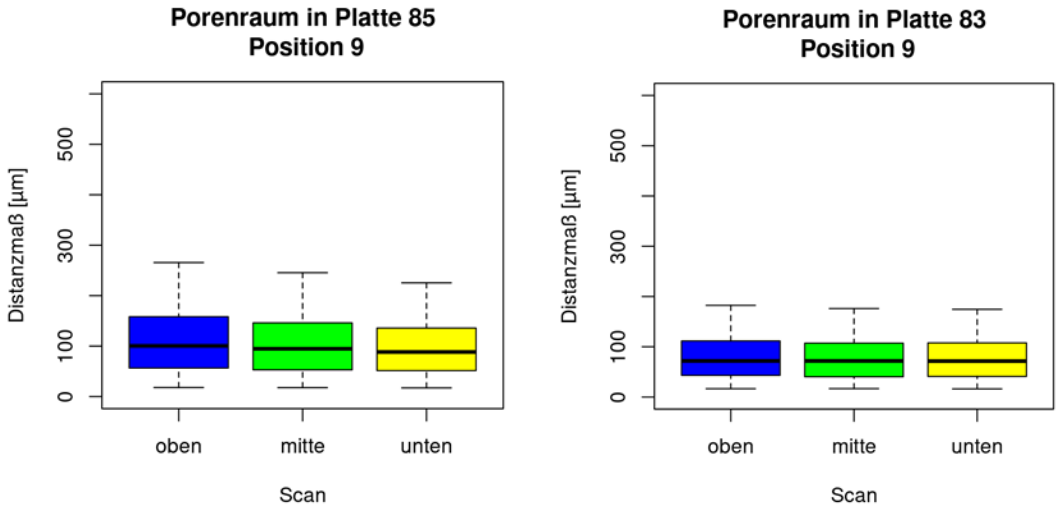


Abbildung 76 Porengrößenanalyse anhand der sphärischen Kontaktverteilung.

VII.1.3 Robuster quantitativer Vergleich der Mikrostruktur anhand der rekonstruierten µCT-Bilder

Die hohe Porosität, geringe Wandstärke der im Vergleich dazu langen Zellulosefasern, geringer Röntgenabsorptionskontrast und starke Oberflächenrauigkeit führen jedoch zu extrem stark variierenden Ergebnissen für die einzelnen 3D Bilder, sowohl bezüglich Probenposition als auch bezüglich des abgebildeten Teilbereichs. Die oben aufgeführten, für Position 9 beobachteten Strukturunterschiede konnten bei Betrachtung der Positionen 6-9 nicht bestätigt werden.

Die Analyse wurde deshalb von den Originalbilddaten startend wiederholt, mit besonderem Fokus auf Robustheit, Vergleichbarkeit und statistischer Signifikanz. Ausreißer-Grauwerte außerhalb des 99.99%-Perzentils werden auf den größten Grauwert innerhalb dieses Bereichs gesetzt, um einerseits Vergleichbarkeit zu sichern und andererseits durch Probenpräparation und –halterung induzierte Artefakte zu reduzieren. Anschließend werden die Grauwerte lokal in einer Umgebung von 160 Pixeln normalisiert.um Variationen aufgrund der schwankenden lokalen Materialdichte zu reduzieren.

Für die Binarisierung werden zwei globale Schwellwerte im Hysteresis-Thresholding kombiniert: Voxel heller als die obere Schwelle sind Material. Sie wird so gewählt, dass nur sicher zum Material gehörende Voxel ausgewählt werden. Die untere Schwelle wird so gewählt, dass die Oberfläche visuell überzeugt, auch um den Preis viele Rauschpixel zu erfassen. Durch den Hysterese-Schritt werden alle nicht mit dem Material zusammenhängenden Rauschpixel entfernt.

Eine Dilatation mit einem kleinen strukturierenden Element liefert dann eine Maske für die eigentliche Segmentierung des Materials. Diese wird nach einer weiteren Rauschminderung schließlich durch globalem Schwellwert nach Otsu für alle Voxel unter der Maske erreicht.

Analyse aller 4x3 3D Bilder, unterteilt in 400³ Voxel große Teilbilder, ergibt wenige statistisch signifikante Unterschiede. Der augenfälligste bleibt die verschieden stark ausgeprägte Anisotropie, siehe Abbildung 77.

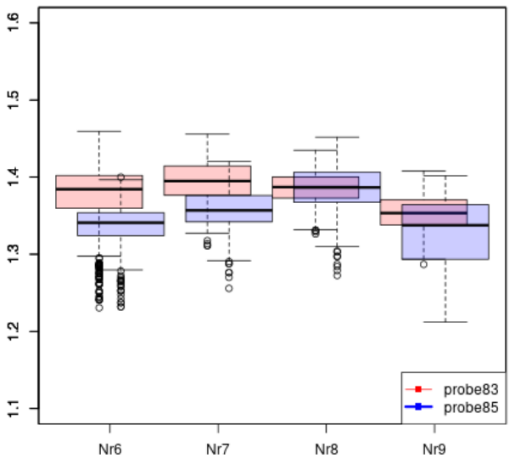


Abbildung 77 Anisotropie der Proben aus 83 und 85, gemessen anhand des Verhältnisses $a=p_{2,z}/S$ für Teilvolumina der Größe 400³ Voxel, was einem Volumen von ca. (5.12 mm)³ entspricht.

VII.1.4 Angepasste Modellstrukturen

Zur Nachbildung der realen Strukturen werden zunächst einzelne Objekte aus den hochaufgelösten SRµCT-Aufnahmen klassifiziert nach

- Einzelfasern
- Faserbündel in einer Ebene (Flöße)
- mehrere gestapelte Faserbündel (Brocken).

In GeoDict [GeoDict 2021] werden diese Komponenten zunächst einzeln modelliert, wobei der Fokus hier auf den Gesamtproportionen bezüglich Durchmesser, dem Volumen sowie der Anordnung bzw. Krümmung der Fasern liegt. Die daraus entstandene Datenbank ermöglicht eine Superposition zur finalen Gesamtstruktur. Hierzu können zunächst unterschiedliche Kombinationen der Bestandteile zusammengestellt werden und diese dann anschließend noch im Durchmesser und der Länge skaliert sowie in ihrer Orientierung manipuliert werden.

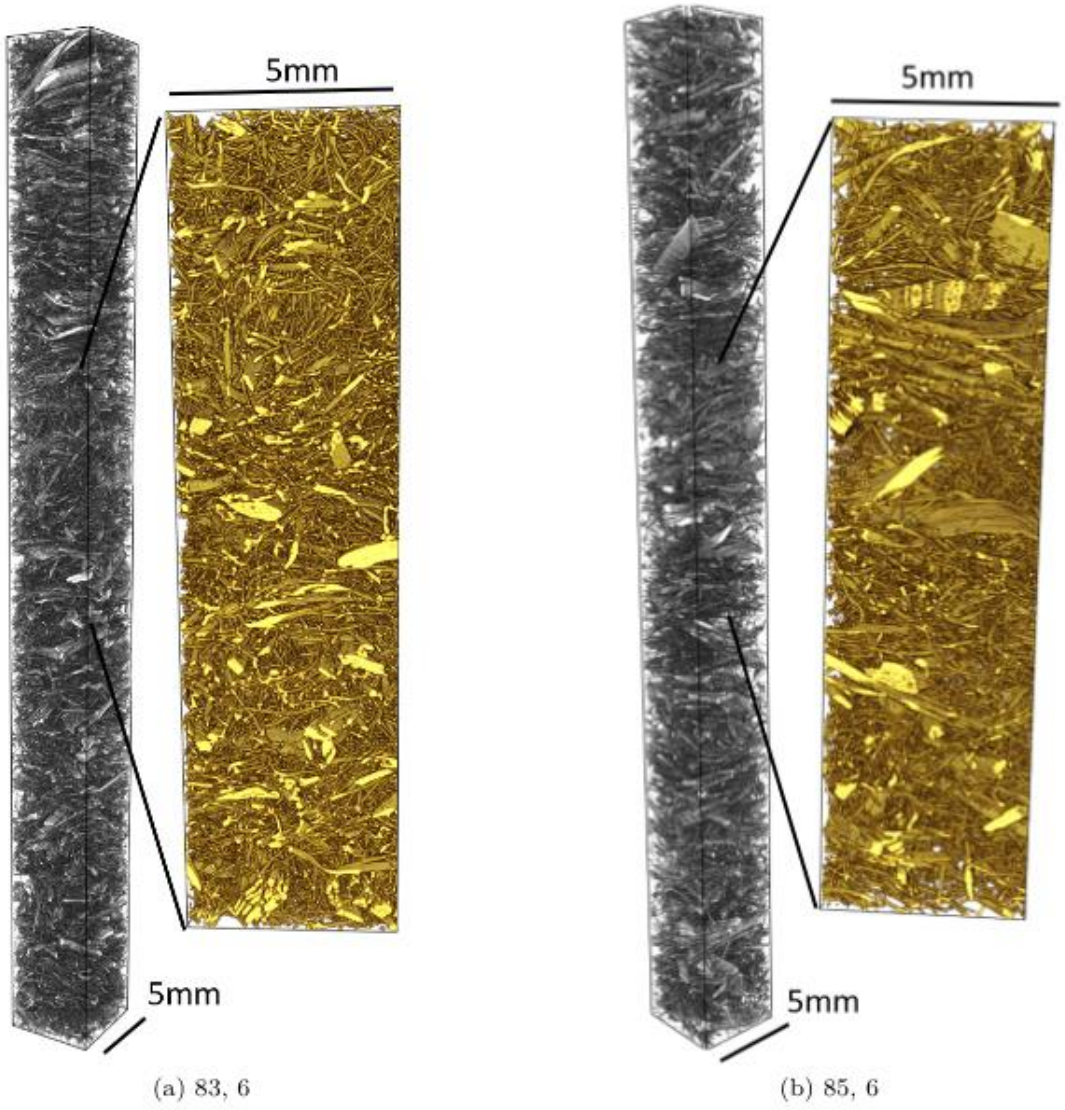


Abbildung 78 Rekonstruierte µCT-Bilder der Proben aus 83 und 85, jeweils von Position 6

VII.1.5 Materialsimulation

Nachfolgend soll der interaktive Nachbildungsprozess am Beispiel von Probe 83 mittels GeoDict [GeoDict 2021] dargestellt werden. Ausgangspunkt sind die globalen Stoffeigenschaften wie z.B. der Feststoffvolumenanteil und die Materialdichte sowie die extrahierten Fasern, Flöße und Brocken. In diesem Fall stehen 7 Einzelfasern, 16 Flößen und 4 Brocken unterschiedlichster Formen zur Verfügung.

Ziel ist es, durch Variationen der Einzelkomponenten in ihren Anteilen, der Größe und Form sowie der Orientierung eine repräsentative Modellstruktur zu generieren. Als Maß für die Qualität der nachgebildeten Geometrie werden unter anderem die Werte der Oberflächennormale mit denen der CT-Aufnahme verglichen. Tabelle 24 zeigt repräsentativ einige Variationen aus einer umfangreichen Studie sowie die resultierenden Normalen und Wärmeleitfähigkeiten. Dabei entspricht Sx der Oberfläche, welche eine Normale in X-Richtung aufweist und Sx/S dementsprechend dem Anteil

bezogen auf die Gesamtfläche. Sz/Sx spiegelt die Abweichung zwischen den beiden betroffenen Raumrichtungen wider.

Es ist zu erkennen, dass die Modelle v5 und v7 bezüglich der Oberflächennormalen die besten Ergebnisse erzielen, nicht jedoch bei der Wärmeleitfähigkeit in Z-Richtung. Grund dafür ist die dominierende Oberflächennormale in Dickenrichtung Z, weshalb Brocken und Flöße vorzugsweise planar im Medium liegen und somit die Wärmeleitfähigkeit in Richtung des Haupttemperaturgefälles nicht begünstigen. Modell v6 zeigt gegenwertige Resultate. Hier sind die Normalen schwächer in Z-Richtung ausgebildet, weshalb Brocken und Flöße vorzugweise in Richtung der Wärmeleitfähigkeits-messung orientiert sind und somit die Wärmeleitung verstärken.

Bei einer visuellen Betrachtung der Geometrien (siehe Abbildung 79) ist jedoch Modell v7 am nächsten an der CT-Aufnahme, weshalb diese vorzuziehen ist.

Die Wärmeleitfähigkeit zeigt, global betrachtet, nur geringe Unterschiede der einzelnen Strukturen untereinander. Hier liegt die Vermutung einer geringen Sensitivität bezüglich geometrischer Variationen nahe, was im nächsten Kapitel weiter untersucht werden soll.

Tabelle 24 Oberflächennormale von CT-Aufnahmen und Modellen sowie die simulierte Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung

Geometrie / Variation	Oberflächennormale				Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung Z
	Sx/S	Sy/S	Sz/S	Sz/Sx	mW/(m·K)
CT-Aufnahme	**0.22 … 0.23**	**0.22 … 0.23**	**0.31 … 0.32**	**1.35 … 1.45**	**-**
Modell_v1	0.238	0.233	0.302	1.272	28.897
Modell_v2	0.234	0.240	0.301	1.288	28.857
Modell_v3	0.239	0.238	0.303	1.267	28.983
Modell_v4	0.262	0.260	0.289	1.103	29.470
Modell_v5	**0. 224**	**0.221**	**0.303**	**1.354**	**29.385**
Modell_v6	**0.264**	**0.262**	**0.242**	**0.915**	**31.278**
Modell_v7	**0.222**	**0.230**	**0.305**	**1.378**	**28.975**
Modell_v8	0.254	0.248	0.274	1.081	28.610
Modell_v9	0.250	0.259	0.280	1.118	29.720

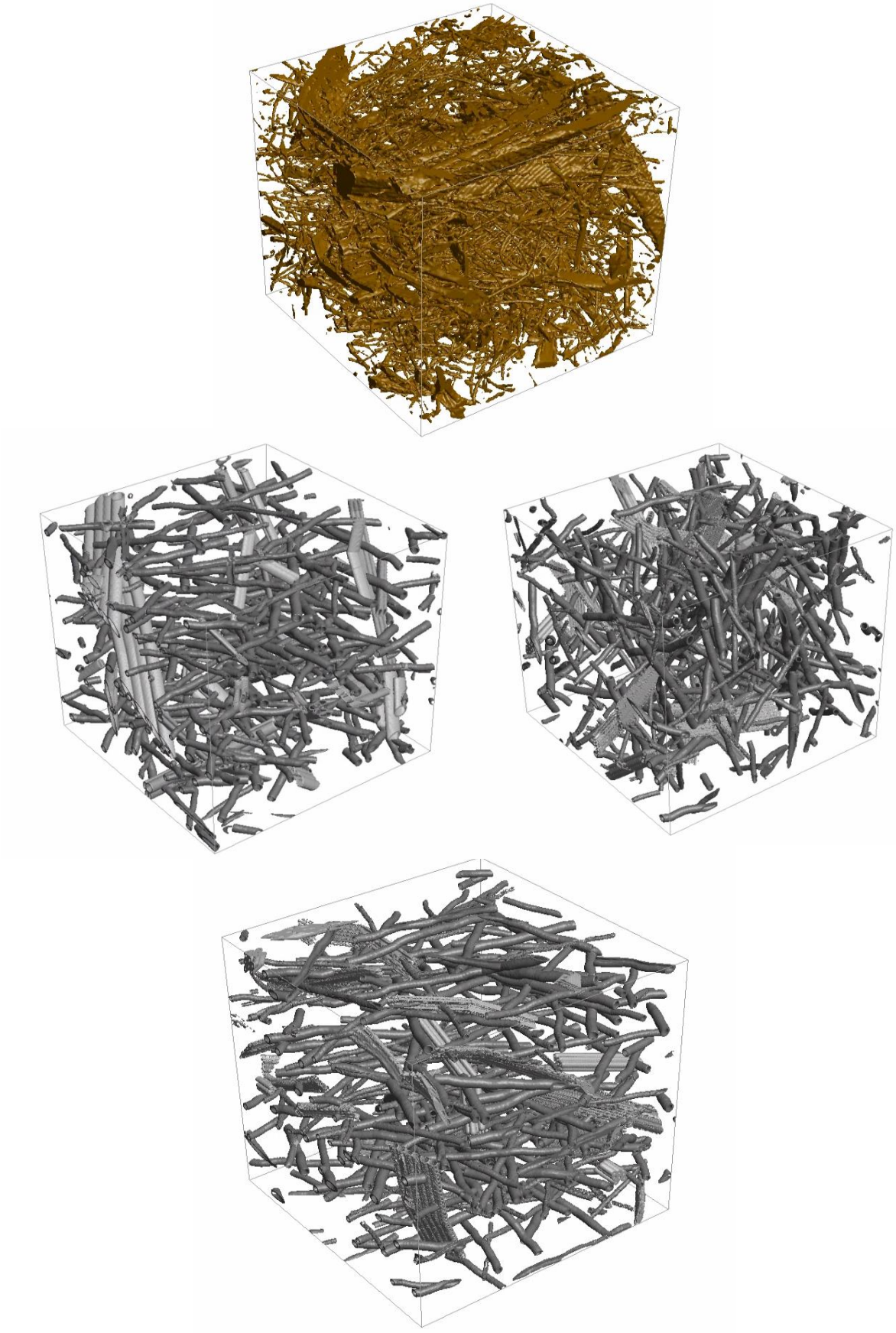


Abbildung 79 CT-Aufnahmen (oben) im Vergleich zu den Modellen v5 und v6 (Mitte) sowie v7 (unten)

Nachfolgend soll die Sensitivität der Wärmeleitfähigkeit für das Modell von Probe 83 untersucht werden. Ausgangspunkt ist die zuvor ermittelte Geometrie, welche der CT-Aufnahme am ehesten entspricht (vgl. Abbildung 79 unten). Sie zeigt einen 500x500x500 Voxel großen, repräsentativen Block des Dämmstoffes bei einer Voxellänge von 4 µm. Der Feststoffvolumenanteil beträgt 3.68%, wovon 0.7% Brocken und 0.3% Flöße mit sehr starker Orientierung in XY-Richtung enthalten sind. Die Zellulosefasern haben einen Anteil von 2.68 % und sind gaußverteilt im Durchmesser um den Mittelwert von 50 µm mit Standardabweichung von 20 µm. Die Zellulosefasern haben eine Länge von 1 mm und sind ebenfalls stark in-plane orientiert. Bzgl. der Faserorientierung ist quantitativ anzumerken, dass 98 % der Objekte in XY-Richtung und 2 % in Z-Richtung ausgerichtet sind.

Für eine umfangreiche Parameterstudie wurden die Stoffgrößen

- Feststoffvolumenanteil der Gesamtgeometrie,
- Feststoffvolumenanteil von Brocken und Flößen,
- Faserorientierungstensor,
- Durchmesser der Zellulosefasern
- sowie die Länge der Zellulosefasern

betrachtet. Zur besseren Abschätzung wurden zusätzlich noch mehrere Simulationen unter Variation der Zufallsverteilung bei der Strukturgenerierung mit gleichbleibenden Stoffparametern durchgeführt und anschließend gemittelt, wobei die Abweichungen nur sehr gering ausgefallen sind.

Abbildung 80 zeigt die Wärmeleitfähigkeit über den prozentual erhöhten bzw. reduzierten Werten des jeweiligen variierten Parameters und gibt einen Überblick über die Sensitivität und Schwankung der Zielgröße. Wie zu erwarten, ergibt sich bei der Variation des gesamten Feststoffvolumenanteils (gelbe Kurve) der größte Anstieg bzw. Abfall (steilster Gradient) der Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus dominieren die Brocken und Flöße diesen Effekt, was am progressiven Kurvenverlauf (orangene Kurve) zu sehen ist. Des Weiteren erhöht eine Anordnung der Fasern in die Hauptrichtung des Temperaturgefälles (rote Kurve) die Wärmeleitung. Größeneffekte der einzelnen Zellulosefasern (grüne und blaue Kurve) weisen die geringste Sensitivität auf.

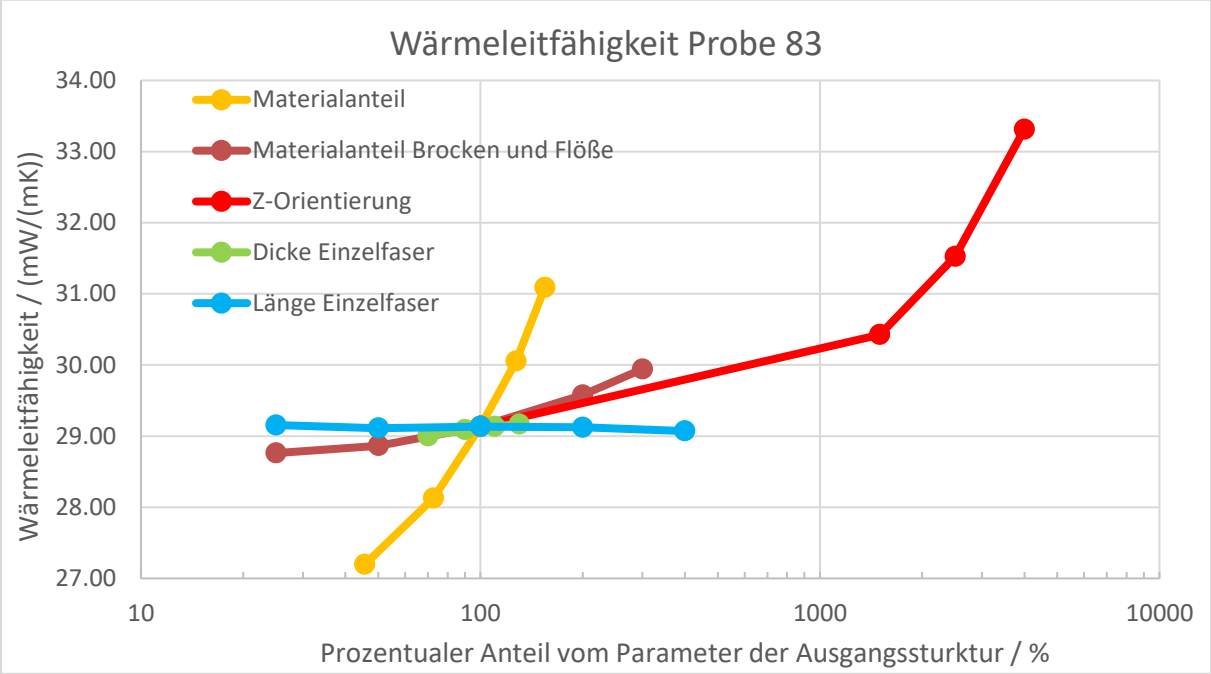


Abbildung 80 Sensitivität der Wärmeleitfähigkeit von Probe 83 in GeoDict

Die Visualisierungen der Temperatur und des Wärmeflusses tragen zum Verständnis dazu bei, dass Faserbündel und Faserbrocken, die bei der Herstellung (Verpressung) in Richtung des Wärmeflusses (z-Richtung) ausgerichtet bleiben, viel Wärme transportieren und praktisch Wärmebrücken darstellen (siehe Abbildung 81).

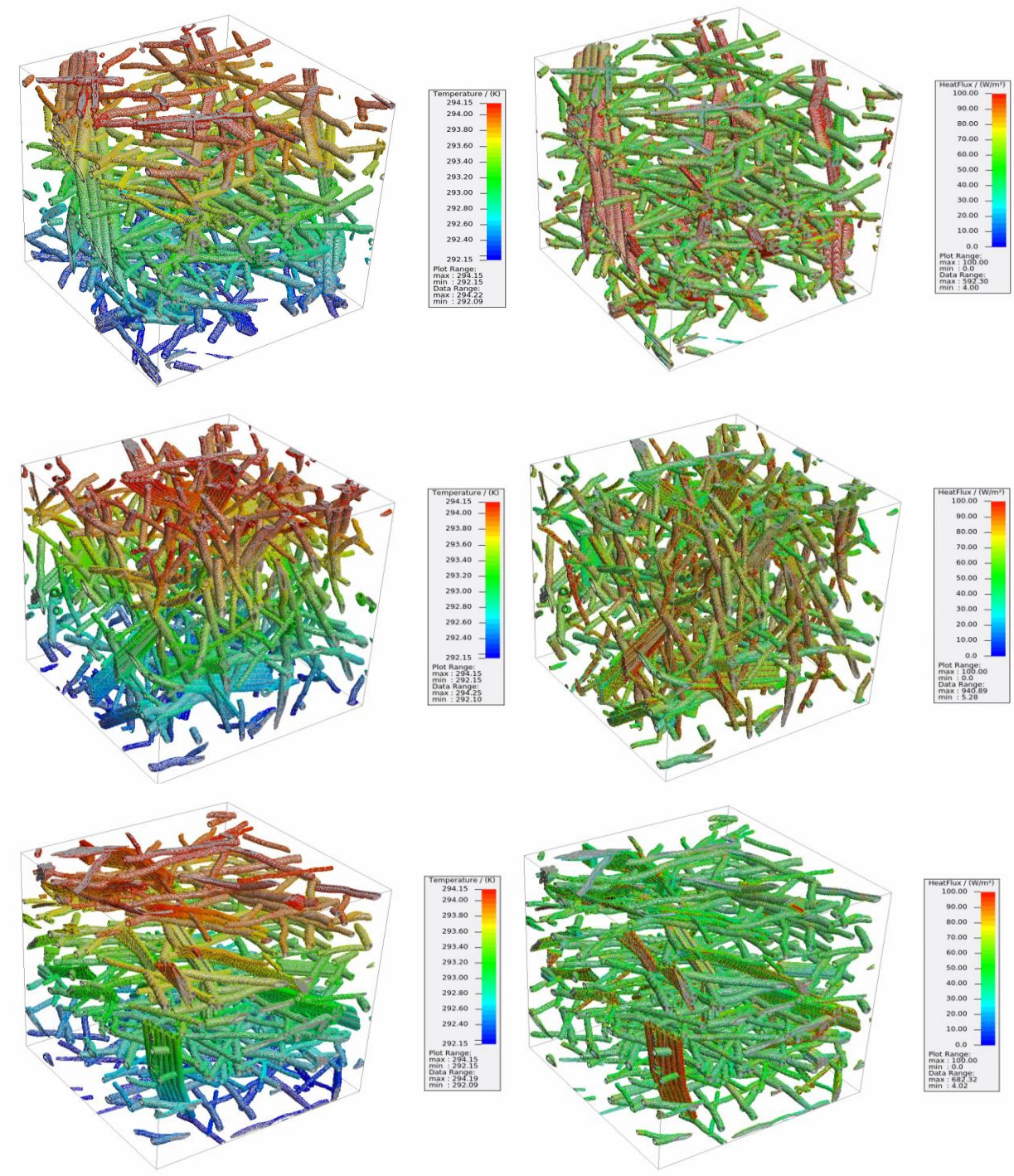


Abbildung 81 Temperatur (links) und Wärmefluss (rechts) für die Proben v5 (oben), v6 (Mitte) und v7 (unten)

VIII. Meilenstein 4: Optimierung

VIII.1 Kontinuierliche Beprobung der Produktion ausgewählter Linien

Durch die statistische Auswertung einer kontinuierlichen Beprobung ausgewählter Linien soll untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen einfach zu ermittelnden Produktionsparametern der Zerfaserung und der Wärmeleitfähigkeit daraus hergestellter Matten und Platten ableitbar ist.

Die ermittelten physikalischen Größen und daraus abgeleitete Variablen sind in IV.1.2 beschrieben. Am Ende des Projekts standen 199 Datensätze zur Verfügung die hinsichtlich der Kerngrößen vollständig waren. Ein Teil der Datensätze weißt Zusatzinformationen wie bspw. die Laufzeit der Segmente auf. Für die zusammengefasste Produktgruppe B5/B6 standen 125 Datensätze zur Verfügung. Für die Produktgruppe B4 standen 74 Datensätze zur Verfügung. Die folgenden Auswertungen wurden mit RStudio Version 1.2.5019 basierend auf R Version 3.6.2 durchgeführt.

Zunächst wurden die Datensätze auf Basis der Mahalanobis Distanz über die Variablen T_cook, p_cook, Z_cook, I_defi_spez, QUANT_20, QUANT_50, QUANT_80, rho_tc und tc bereinigt. Für die Produktgruppe B5/B6 verbleiben 101 Datensätze. Für die Produktgruppe B4 verbleiben 60 Datensätze. Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Verteilung der Mahalanobis-Distanzen vor und nach der Bereinigung der Daten.

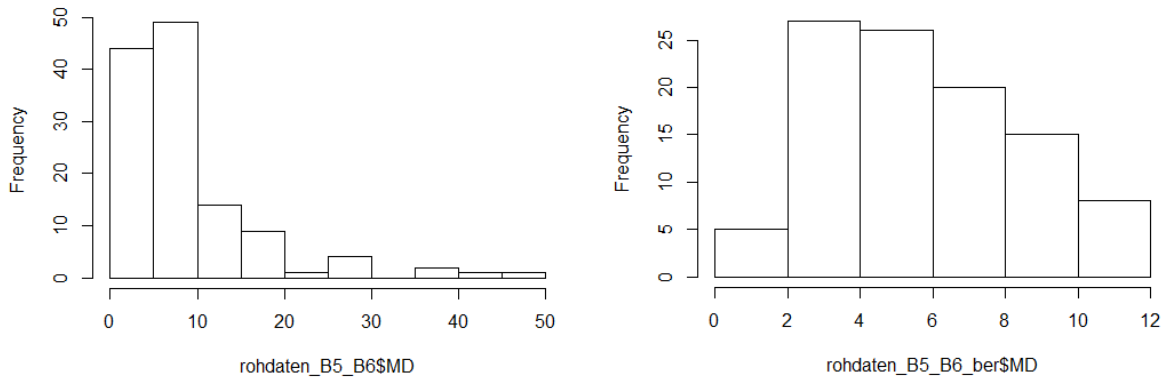


Abbildung 82 Histogramm der Mahalanobis Distanz für die Produktgruppe B5 / B6 vor (links) und nach (rechts) der Bereinigung

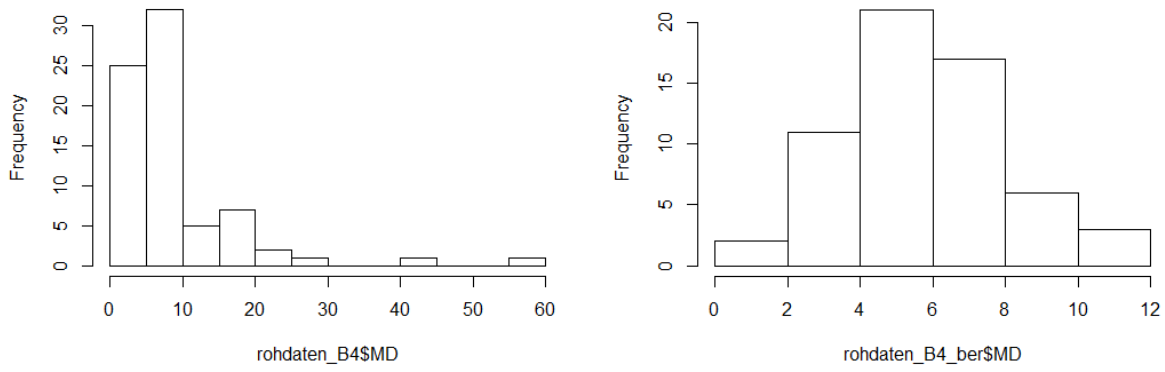


Abbildung 83 Histogramm der Mahalanobis Distanz für die Produktgruppe B4 vor (links) und nach (rechts) der Bereinigung

VIII.1.1 Auswertungen zur Produktgruppe B4

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Auswertungen für die Produktgruppe B4 diskutiert.

VIII.1.1.1 Korrelationsdiagramm und zusammenfassende Diskussion zum Einfluss unterschiedlicher Variablen auf die Wärmeleitfähigkeit der Variante B4

Abbildung 84 zeigt das Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Variablen der Datenbasis B4. Variablenpaare die zu einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α = 0.05 nicht signifikant korrelieren sind ausgekreuzt.

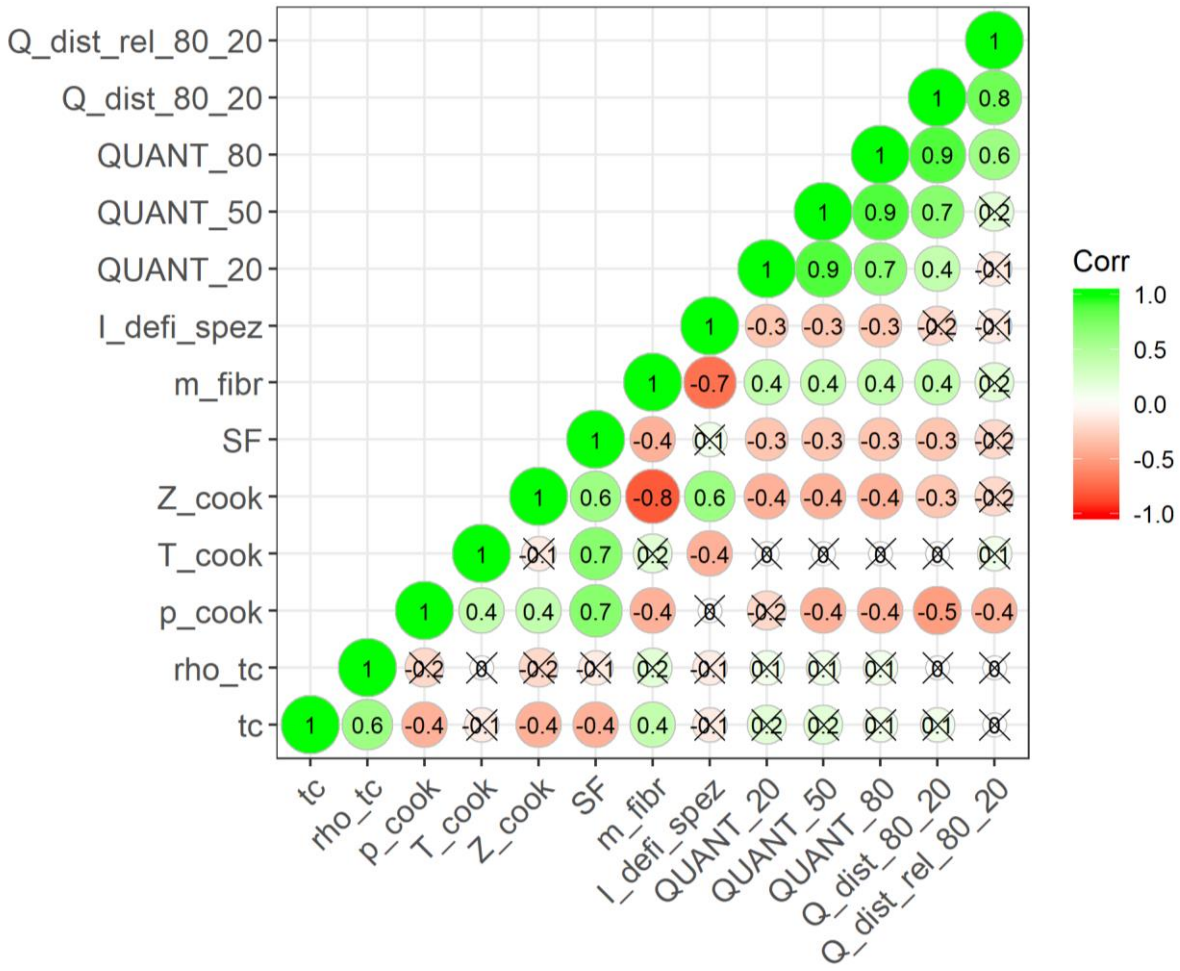


Abbildung 84 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Variablen der Datenbasis B4, Signifikanzniveau 0.05, nicht signifikante Korrelationen sind ausgekreuzt

Erwartungsgemäß zeigen sich gut bestimmte Korrelationen zwischen den Quantilen aus der Siebanalyse. Die Korrelation von Temperatur und Druck im Hackschnitzelkocher ist physikalisch im Prozess begründet. Die spezifische Stromaufnahme im Defibrator ist negativ mit den Quantilen der Siebanalyse korreliert. Dies bedeutet, dass eine hohe Energie beim Zerfasern tendenziell kleinere Fasern mit sich bringt. Interessanterweise besteht auch eine starke negative Korrelation zwischen der Fasermasse und der spezifischen Stromaufnahme. Dies bedeutet, dass bei hohen Faserdurchsätzen die spezifische Stromaufnahme und damit die Energie beim Zerfasern kleiner wird. Dies könnte darauf hindeuten, dass bei entsprechend hohen Durchsätzen der Mahlspalt aufgefahren werden muss. In

gleicher Richtung läuft der Zusammenhang zwischen der Fasermasse und den Quantilen der Siebanalyse. Hier besteht eine positive Korrelation. Bei hohen Fasermassen sinkt die spezifische Stromaufnahme was wiederum zu größeren Fasern führt.

Zusammenhänge zwischen den anderen Produktionsparametern der Zerfaserung (p, T, Z, SF) und den Fasergrößen zeigen sich unausgeprägt mit ähnlich schwachen Korrelationskoeffizienten.

Eine deutliche negative Korrelation besteht zwischen der Kochzeit und der Fasermasse. Dies bedeutet, dass bei hohen Fasermassen die Kochzeit sinkt. Erklärt werden kann dies mit dem Durchsatz im Kocher. Um eine entsprechend lange Verweilzeit zu erreichen ist entweder eine geringe Fasermasse oder ein entsprechend hoher Füllstand im Kocher notwendig. Wenn der Füllstand konstant gehalten wird, führt eine Erhöhung des Massendurchsatzes zu einer Verkürzung der Kochzeit.

In diesem Zusammenhang ist unklar, ob die negative Korrelation zwischen Kochzeit und Fasergrößen (also kleinere Fasergrößen bei längerer Kochzeit) auf die bessere Plastifizierung zurückzuführen ist, oder ein Artefakt der mit der Kochzeit negativ korrelierten Fasermasse und darauffolgend einem engen Mahlspalt mit hoher spezifischer Stromaufnahme und daraus resultierend kleineren Fasergrößen darstellt.

Die Wärmeleitfähigkeit korreliert positiv mit der Rohdichte. Die negative Korrelation zu Druck, Kochzeit und Severity Factor spricht für den Einfluss der Plastifizierung auf die Qualität der Zerfaserung. Gleichzeitig besteht keine Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Stromaufnahme des Defibrators. Ebenfalls zeigt sich keine Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den Quantilen der Siebanalyse.

Um die Struktur der Daten auch visuell zu untersuchen ist in Abbildung 85 die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte aufgetragen. Eine dritte Variable ist jeweils als Punkt mit variabler Größe skaliert. Auf diese Weise kann der Einfluss der Rohdichte ggf. besser vom Einfluss einer dritten Variablen unterschieden werden.

Bei den im Korrelationsdiagramm als signifikant korrelierend detektierten Variablenpaaren, lässt sich auch in Abbildung 85 eine Staffelung der Größen über der Wärmeleitfähigkeit auf der y-Achse nachvollziehen. Dies betrifft den Einfluss von Druck und Kochzeit sowie den Severity-Factor. Darüber hinaus lassen sich aber keine weiteren Einflüsse erkennen.

Um zu überprüfen ob sich ggf. durch die Auswertung der Fraktionen der Siebanalyse deutlichere Zusammenhänge zeigen, als durch die Auswertung der Quantile sind in Abbildung 86 in gleicher Logik die Massenanteile der Siebfraktionen als Datenpunkt skaliert. Auch hier lassen sich keine Muster erkennen, die mit der Wärmeleitfähigkeit zusammenhängen.

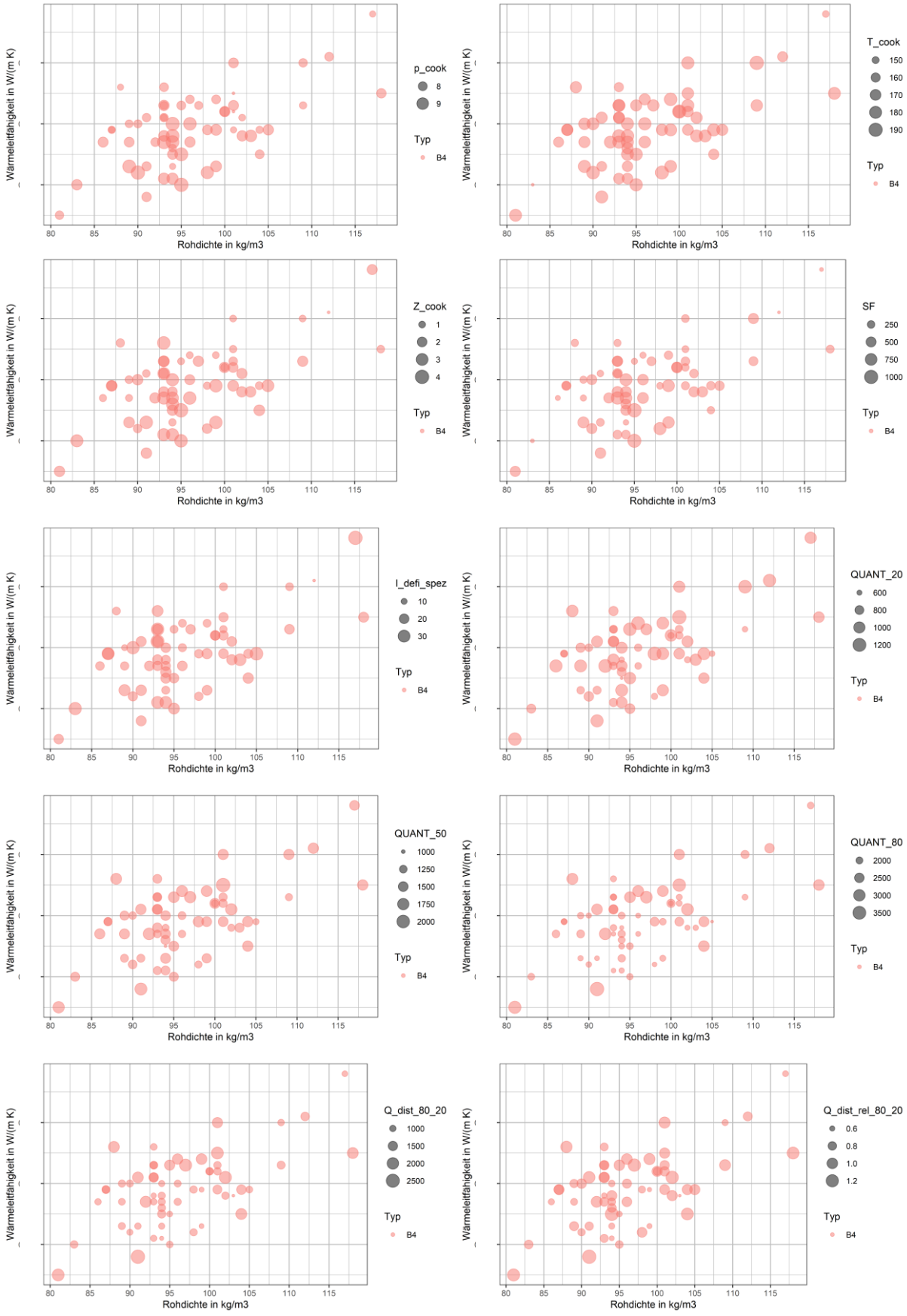


Abbildung 85 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B4), Größe der Datenpunkte gemäß dritter Variablen

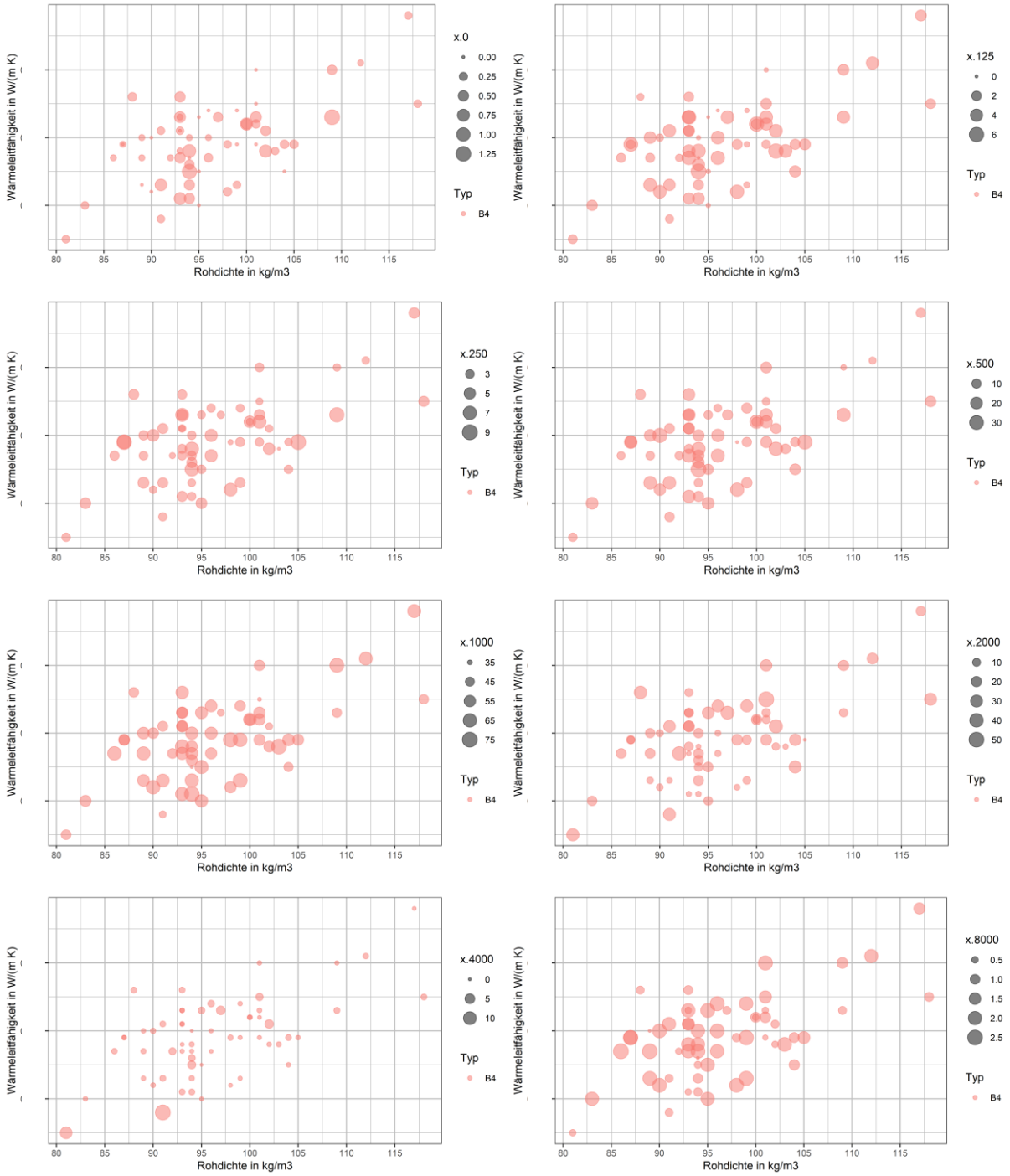


Abbildung 86 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B4), Größe der Datenpunkte gemäß Massenanteil der Siebrückstände in den Fraktionen von 0 (Staubanteil) – 8000 µm.

VIII.1.1.2 Auswertungen zu Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit der Variante B4

Um die Einflüsse ausgewählter Parameter ggf. sichtbar zu machen, wurde die Grundgesamtheit in zwei Teilmengen mit jeweils „hoher“ und „niedriger“ Wärmeleitfähigkeit.

Die Gruppe mit hoher Wärmeleitfähigkeit besteht aus Proben mit einer Wärmeleitfähigkeit > 0.0370 W/(m K). In dieser Gruppe verblieben 23 Beobachtungen.

Die Gruppe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit besteht aus Proben mit einer Wärmeleitfähigkeit < 0.0370 W/(m K). In dieser Gruppe verblieben 33 Beobachtungen.

Abbildung 87 zeigt die Mittelwerte und das Konfidenzintervall für ausgewählte Variablen der Variante B4 nach Aufteilung in die genannten Teilmengen.

Es ist zu erkennen, dass die Teilmenge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit tendenziell eine schlankere Verteilung der Siebgrößen aufweist als die Teilmenge mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Dies ist an den Verteilungen der Fraktionen in den Siebklassen und auch am Abstandsmaß Q_dist_80_20 zwischen den Quantilen zu erkennen. Die Gruppe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit zeigt außerdem tendenziell kleinere Fasergrößen. Alle Quantile sind im Mittelwert etwas niedriger als bei der Gruppe mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Die Unterschiede sind jedoch gering – d. h. die Mittelwerte liegen jeweils im Bereich der Konfidenzintervalle der jeweiligen Gegengruppe.

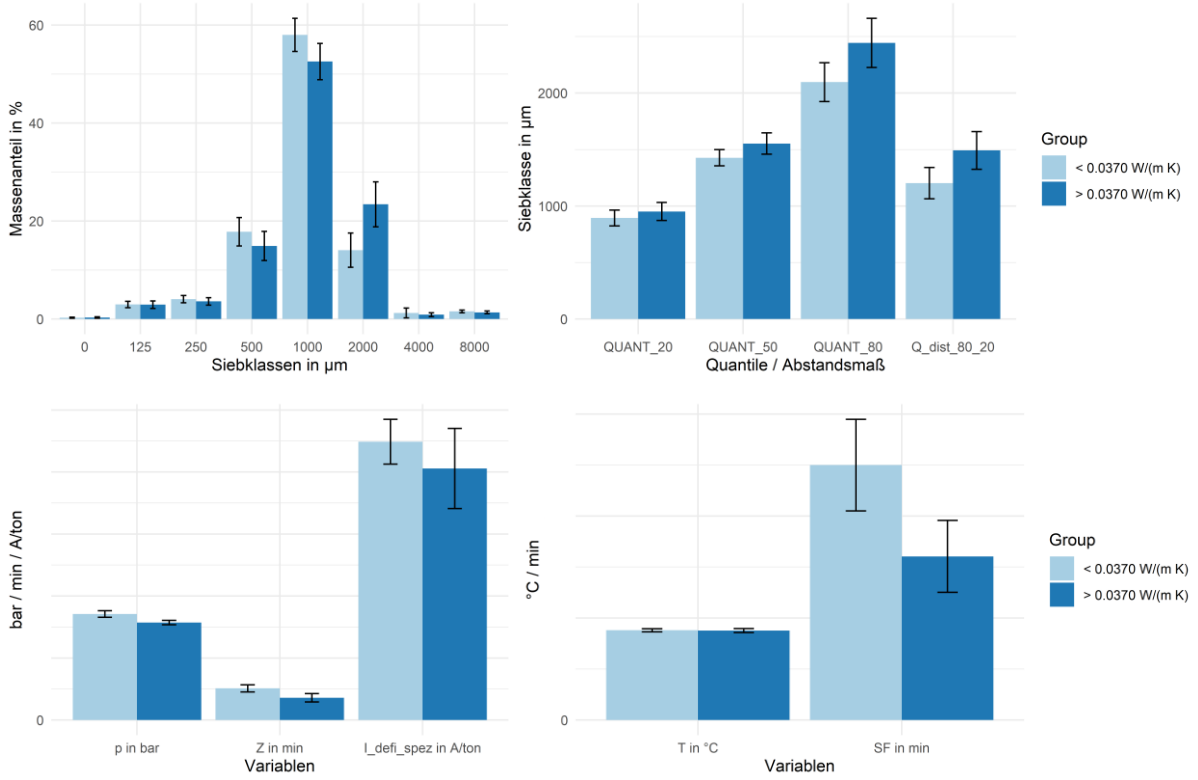


Abbildung 87 Mittelwerte und Konfidenzintervall ausgewählter Variablen der Varianten B4, für zwei Teilmengen mit hoher (λ > 0.0370 W/(m K), N = 23) und niedriger (λ < 0,036 W/(m K), N = 33) Wärmeleitfähigkeit

Bezüglich der Herstellparameter fällt die deutlichste Differenzierung in der spezifischen Energie des Aufschluss (I_defi_spez) und dem Severity-Factor auf. Die Teilmenge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit weist eine höhere spezifische Energie und einen höheren Severity-Factor auf als die Teilmenge mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Insbesondere der Severity-Factor ist signifikant unterschiedlich. Interessant ist auch, dass der Severity Factor, als eine von der Temperatur und Kochzeit abgeleitete Größe deutlich besser differenziert als die Variablen Temperatur und Kochzeit für sich genommen, die sich zwischen den Teilmengen nicht signifikant unterscheiden.

Das Zerfaserungsergebnis ist auch abhängig von der Geometrie der Defibrator Segmente. Es wurden Segmente von insgesamt vier Herstellern verwendet. Um zu überprüfen ob sich ggf. ein Einfluss der Segmente auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt, wurde die Grundgesamtheit nach den Segmentherstellern aufgeteilt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 88 zusammengefasst.

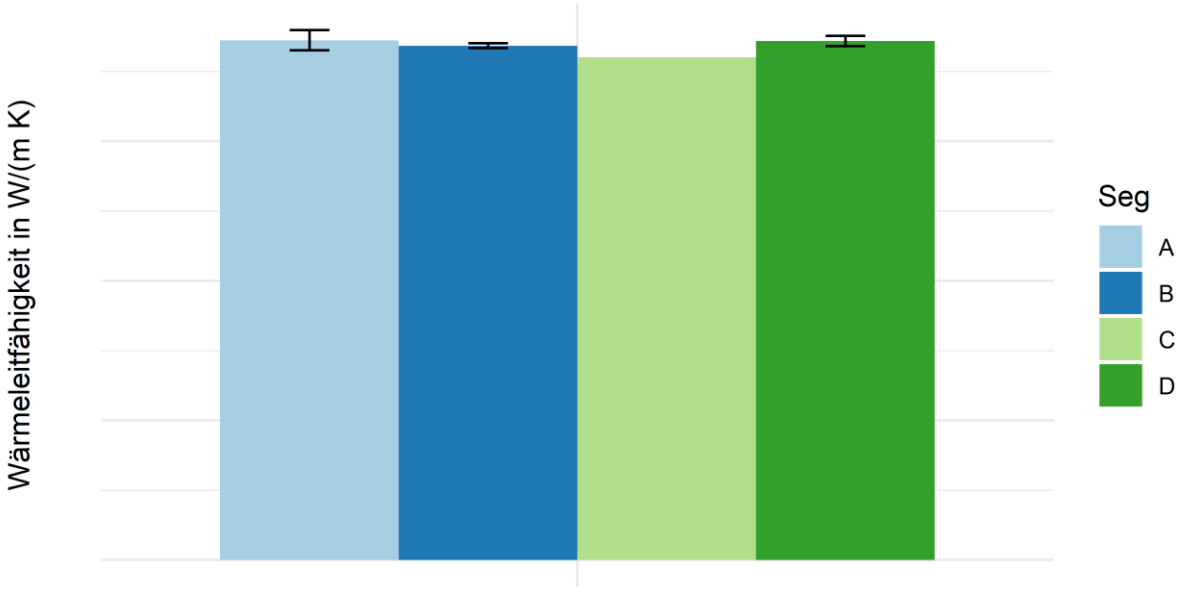


Abbildung 88 Wärmeleitfähigkeit der Variante B4, unterschieden nach Segment-Herstellern A - D

Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit der Produkte nach Herstellung auf unterschiedlichen Segment Typen feststellen.

VIII.1.1.3 Hauptkomponentenanalyse der Variante B4

Im Weiteren wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt um die Struktur der Daten zu erkunden und um zu untersuchen, ob sinnvoll zusammengesetzte Größen der Produktionsparameter evtl. besser zu korrelieren sind als die Einzelgrößen. Die Eingangsgrößen wurden normalisiert und zentriert.

Für die Hauptkomponentenanalyse wurden in der Reihung des Produktionsprozesses von der Hackschnitzel-Plastifizierung über die Mahlung bis zu den Produktionsgrößen und der Wärmeleitfähigkeit die Parameter gemäß Tabelle 25 berücksichtigt. Zur Auswertung kamen unterschiedliche Subgruppen.

Zunächst wurden in Subgruppe 1 alle direkt ermittelten Variablen untersucht, inklusive der Wärmeleitfähigkeit. Diese Untersuchung zeigt die Struktur der Daten insgesamt.

In der Subgruppe 2 werden alle direkt ermittelten Variablen mit Ausnahme der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte der Platten untersucht. In dieser Subgruppe ermittelte Hauptkomponenten werden anschließend mit der Wärmeleitfähigkeit korreliert. Diese Untersuchung soll zeigen ob zusammengesetzte Größen besser mit der Wärmeleitfähigkeit korrelieren als die Einzelgrößen.

In der Subgruppe 3 werden bestimmte Größen zusammengefasst. Die Hauptkomponenten werden wieder mit der Wärmeleitfähigkeit korreliert.

Tabelle 25 Parameterumfänge zur Auswertung mittels Hauptkomponentenanalyse für die Variante B4

			Subgruppen		
Parameter	Einheit	Abhängigkeiten	1	2	3
m_fibr	ton		X	X	
T_cook	°C		X	X	
p_cook	bar	f(T)	X	X	
Z_cook	min		X	X	
SF	min	f(T_cook, Z_cook)			X
I_defi_spez	A/ton	f(I_defi, m_fibr)	X	X	X
QUANT_20	µm		X	X	
QUANT_50	µm		X	X	X
QUANT_80	µm		X	X	
Q_dist_80_20	µm	f(QUANT_80, QUANT_20)			X
rho_tc	kg/m3		X		
tc	W/(m K)		X		

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Subgruppe 1 zeigt Tabelle 26.

Im Scree-Plot zeigt sich nach der dritten Hauptkomponente ein Knick. Auch dem Kaiser-Kriterium zur Folge sind die ersten drei Hauptkomponenten für die Varianz der Daten relevant. In der ersten Komponente zeigen sich die stärksten Ladungen der Fasergrößen, der Kochzeit sowie der Fasermasse. Die Kochzeit und die Fasermasse stehen sich im Biplot direkt gegenüber, was sich auch in der sehr strengen negativen Korrelation dieser Variablen zeigt (Abbildung 84).

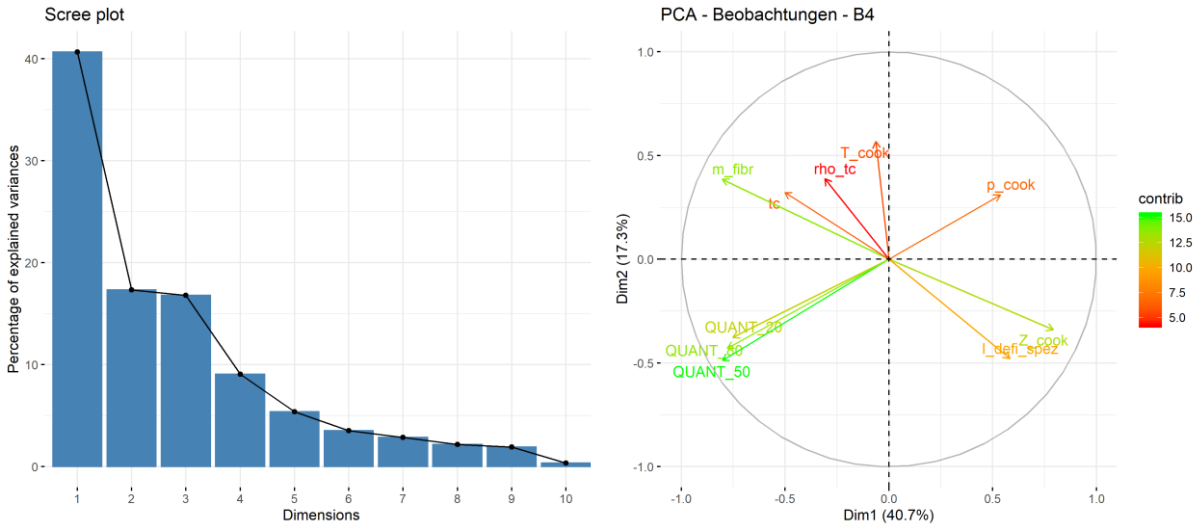
In der zweiten Hauptkomponente zeigt sich die stärkste Ladung der spezifischen Stromaufnahme im Defibrator und eine hohe Ladung auf der Temperatur.

In der dritten Hauptkomponente zeigt sich die stärkste Ladung auf der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte sowie die stärkste Ladung auf Temperatur und Druck im Kocher.

Mit Ausnahme der Fasergrößen und der gleichgerichteten jeweils höchsten Ladung von Temperatur und Kocher erschließen sich keine physikalisch sinnvollen Zusammenhänge zwischen den jeweils stark repräsentierten Ladungen der Hauptkomponenten. Bspw. laden die Temperatur und die Kochzeit in jeweils unterschiedlichen Hauptkomponenten, obwohl die Parameter als Severity-Factor für die Intensität des Aufschlusses zusammengefasst werden könnten.

Tabelle 26 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 1

B4	2.02	1.32	1.30	0.95	0.73	0.59	0.54	0.46	0.44	0.19
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
m_fibr	-0.40	0.29	-0.03	0.29	-0.02	0.06	-0.15	-0.18	-0.78	-0.07
p_cook	0.27	0.24	-0.42	-0.36	-0.48	0.23	-0.13	-0.52	0.01	-0.03
T_cook	-0.03	0.43	-0.44	-0.32	0.65	0.20	0.04	0.24	0.02	0.00
Z_cook	0.39	-0.26	-0.02	-0.32	0.02	-0.15	0.58	0.07	-0.56	0.05
l_defi_spez	0.29	-0.36	0.33	-0.19	0.35	0.42	-0.53	-0.15	-0.20	-0.03
QUANT_20	-0.37	-0.29	-0.18	-0.29	-0.35	0.28	-0.15	0.49	-0.11	0.44
QUANT_50	-0.40	-0.37	-0.16	-0.23	-0.01	0.06	0.10	-0.03	0.04	-0.78
QUANT_80	-0.39	-0.33	-0.15	-0.12	0.32	-0.24	0.10	-0.59	0.09	0.43
rho_tc	-0.15	0.30	0.42	-0.61	-0.07	-0.51	-0.25	0.05	-0.05	-0.04
tc	-0.25	0.25	0.51	-0.15	-0.04	0.55	0.49	-0.17	0.13	0.07



Der zweite Parameterumfang schließt die Wärmeleitfähigkeit und die Rohdichte aus. Die an den übrigen Parametern ermittelten relevanten Hauptkomponenten werden mit der Wärmeleitfähigkeit korreliert. Damit soll untersucht werden, ob sich durch Linearkombinationen von Parametern aussagekräftigere Korrelationen zur Wärmeleitfähigkeit erstellen lassen, als zu Einzelparametern.

Die Ergebnisse zeigt Tabelle 27. Die Ladungen verteilen sich qualitativ ähnlich zu der Untersuchung der Subgruppe 1. Die erste Hauptkomponente erklärt ca. 48 % der Varianz der Daten und lädt stark auf die Fasergrößen und die Fasermasse. Die zweite Hauptkomponente repräsentiert vor allem die Temperatur und die spezifische Stromaufnahme im Defibrator, während die dritte Hauptkomponente nochmal allgemein stark auf die Prozessgrößen im Defibrator (T_cook, p_cook, Z_cook) und die Fasergrößen lädt.

Die Korrelationen der ersten drei Hauptkomponenten zur Wärmeleitfähigkeit zeigt Abbildung 89. Es lassen sich keine signifikanten Zusammenhänge erkennen. Gegenüber der Auswertung der Korrelationen zwischen den Einzelgrößen und der Wärmeleitfähigkeit lassen sich keine neuen Schlüsse ziehen.

Tabelle 27 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 2

B4	1.96	1.31	1.06	0.74	0.57	0.47	0.44	0.19
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
m_fibr	-0.40	0.28	-0.34	0.03	-0.17	0.10	-0.78	-0.05
p_cook	0.25	0.39	0.52	0.45	-0.22	0.50	-0.08	-0.05
T_cook	-0.04	0.58	0.36	-0.67	-0.12	-0.25	0.05	0.00
Z_cook	0.39	-0.23	0.39	-0.03	0.47	-0.28	-0.59	0.04
l_defi_spez	0.31	-0.48	0.04	-0.39	-0.67	0.21	-0.19	-0.02
QUANT_20	-0.40	-0.17	0.38	0.32	-0.38	-0.47	-0.02	0.45
QUANT_50	-0.43	-0.26	0.36	0.00	0.02	-0.01	0.02	-0.79
QUANT_80	-0.42	-0.22	0.25	-0.30	0.32	0.58	-0.01	0.42

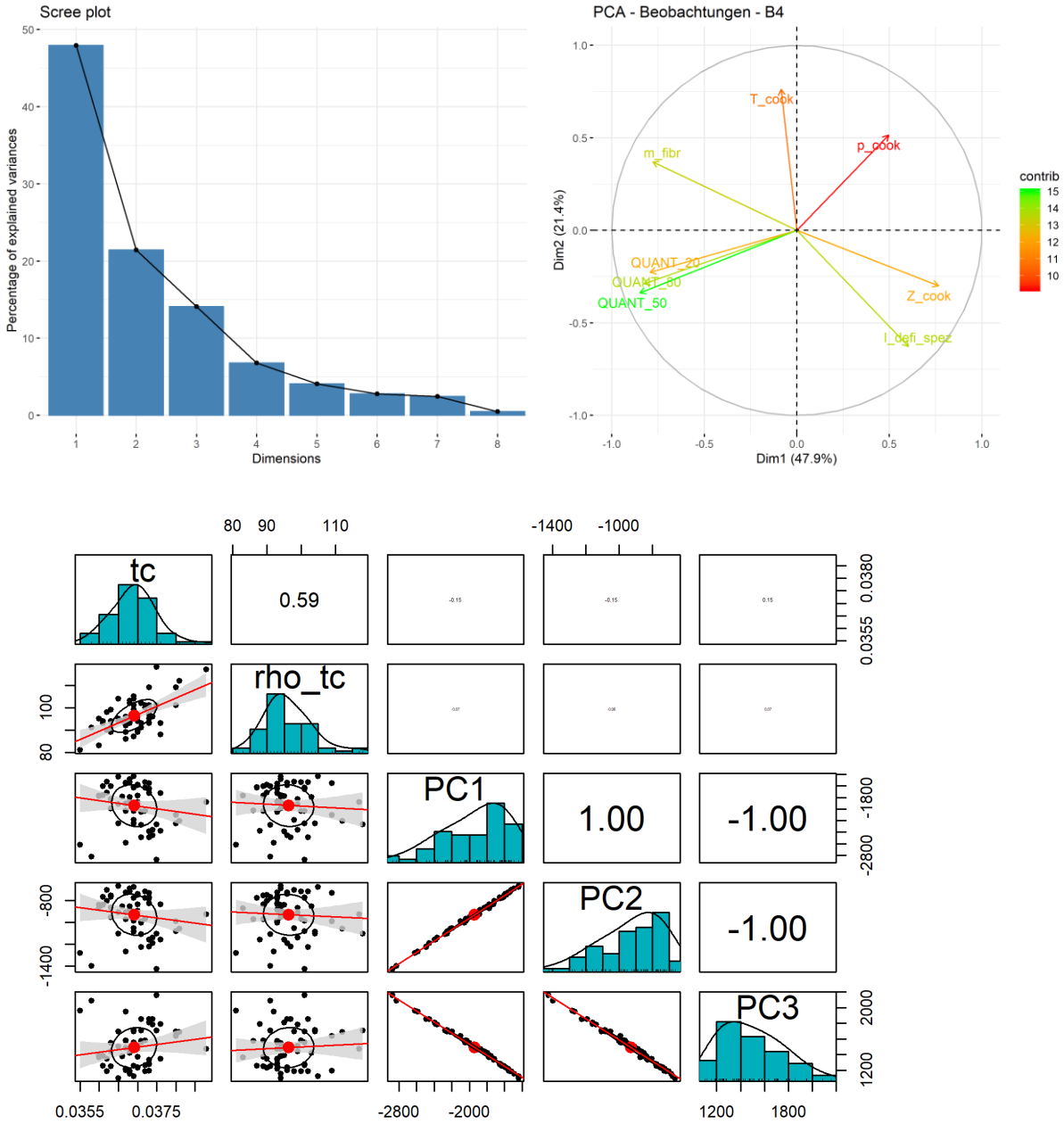


Abbildung 89 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4, gemäß Tabelle 27

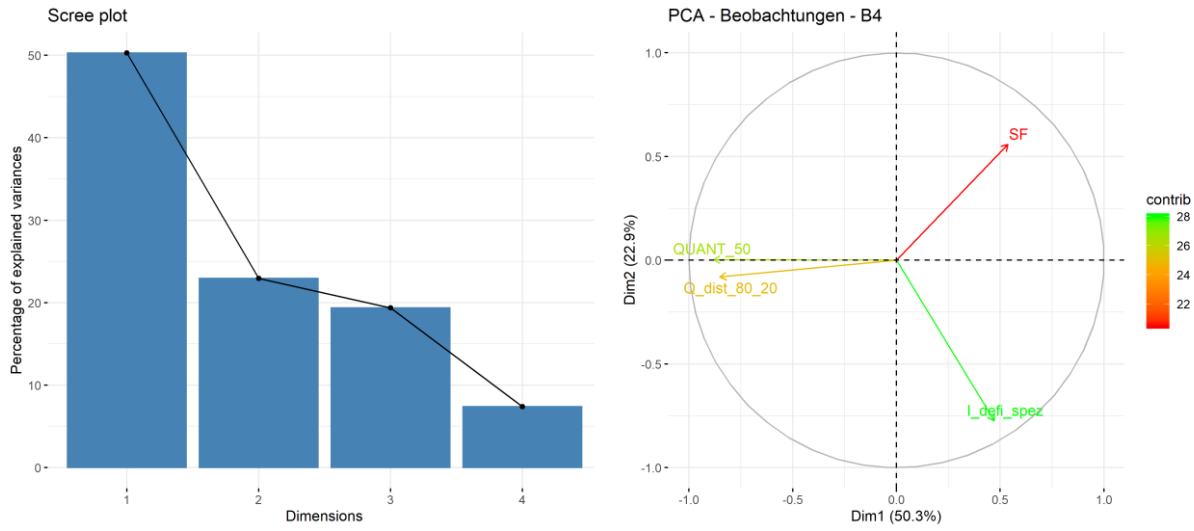
In der dritten Subgruppe erfolgt eine Reduzierung der Zahl der Variablen. Ausgeschlossen wird der Druck im Kocher, der mit der Temperatur prozesstechnisch positiv korreliert. Die Temperatur und die Kochzeit werden zum Severity-Factor zusammengefasst, der eine äquivalente Kochzeit bei einer Bezugstemperatur von 100°C beschreibt. Die Quantile der Siebmaschenverteilung werden auf das 50 %-Quantil und das Distanzmaß zwischen 80%- und 20%-Quantil reduziert. Die spezifische Stromaufnahme im Defibrator verbleibt. Die Fasermasse wird ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der dritten Subgruppe der Variante B4 zeigt Tabelle 28.

Die ersten beiden Hauptkomponenten erklären bereits ca. 73 % der Varianz der Daten. In der ersten Hauptkomponente liegen die stärksten Ladungen auf den Fasergrößen QUANT_50 und Q_dist_80_20. In der zweiten Hauptkomponente lädt die spezifische Stromaufnahme im Defibrator und in der dritten Hauptkomponente der Severity-Factor.

Tabelle 28 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B4, Gruppe 3

B4	1.42	0.96	0.88	0.54
	PC1	PC2	PC3	PC4
SF	0.38	0.58	-0.72	0.03
I_defi_spez	0.33	-0.81	-0.48	0.09
QUANT_50	-0.62	0.00	-0.29	0.73
Q_dist_80_20	-0.60	-0.08	-0.41	-0.68



Die auf dieser Basis ermittelten ersten drei Hauptkomponenten werden wieder mit der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte korreliert (Abbildung 90). Dabei zeigt sich, dass wieder die Hauptkomponenten untereinander, nicht aber mit der Wärmeleitfähigkeit korrelieren.

Der Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der ersten Hauptkomponente, die stark von den Quantilen der Siebanalyse bestimmt wird, ist ähnlich schwach wie bei der Betrachtung der Einzelgrößen der Siebanalyse.

Eine zwar schwach bestimmte aber vorhandene negative Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der zweiten Hauptkomponente wird durch den Severity-Factor und die spezifische Stromaufnahme bestimmt. Beide Variablen wurden bereits bei der Auswertung der Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit als relevant erkannt (Abbildung 87). Der Zusammenhang bestätigt sich hier, ist aber auch nicht von höherer Güte als bspw. der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Severity-Factor im Korrelationsdiagramm (Abbildung 84).

Unter Umständen ist der relativ große Bereich der Rohdichte innerhalb der untersuchten Variante B4 der maßgebliche Einfluss. Unterschiede in den Produktionsparametern und Fasergrößen könnten demzufolge bei einer Auswertung über den gesamten Rohdichtebereich hinweg, in den Hintergrund treten.

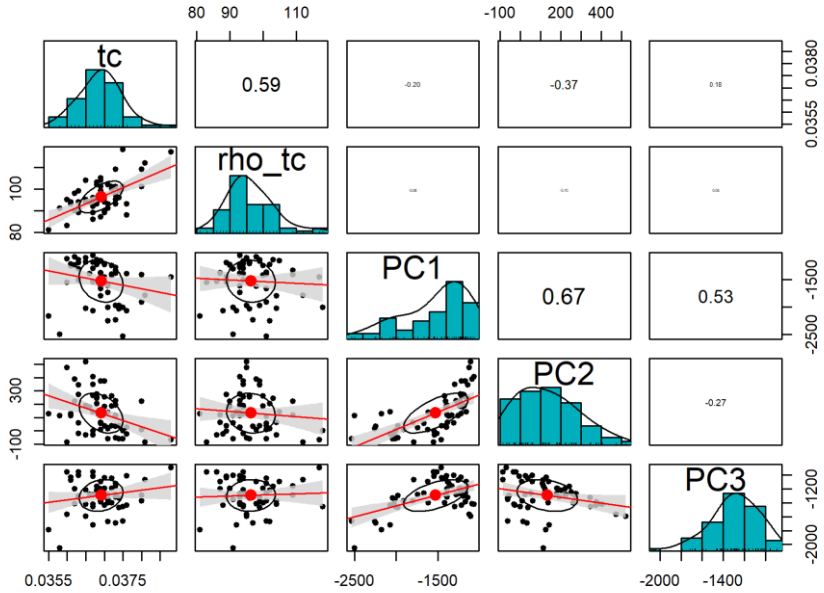


Abbildung 90 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4, gemäß Tabelle 28

Die Auswertung der Subgruppe 3 wurde deshalb nochmal wiederholt unter Einschränkung eines Rohdichtebereichs von 90 < rho_tc < 100 [kg/m³]. Die so reduzierte Datenbasis weist noch einen Umfang von 31 Beobachtungen auf.

Gegenüber den Ergebnissen in Tabelle 28 verschieben sich die Ladungen in den Hauptkomponenten nur unwesentlich. Es ergeben sich keine Verbesserungen in den Korrelationen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den ermittelten Hauptkomponenten (Abbildung 91).

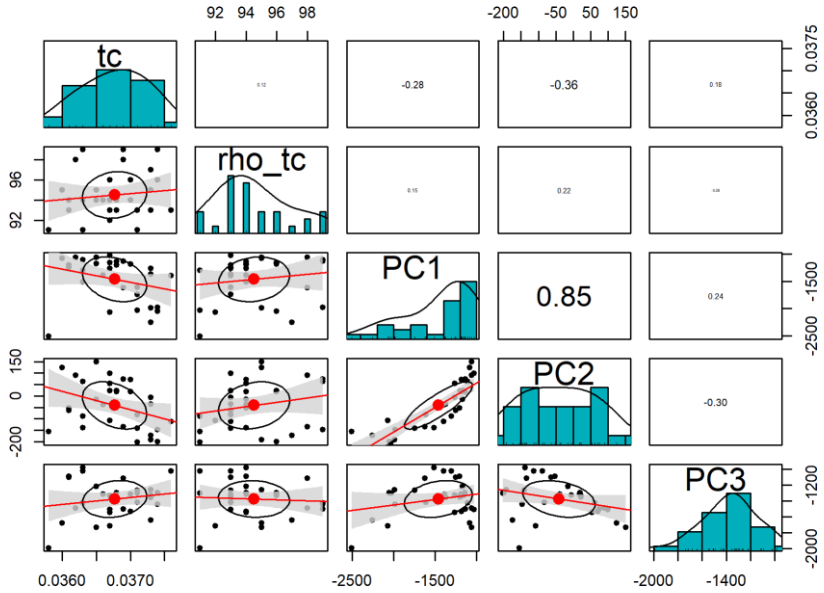


Abbildung 91 Korrelationsdiagram, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B4 (Datenbasis mit eingeschränktem Rohdichtebereich)

VIII.1.2 Auswertungen zur Produktgruppe B5/B6

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertungen für die Produktgruppe B5/B6 diskutiert.

VIII.1.2.1 Korrelationsdiagramm und zusammenfassende Diskussion zum Einfluss unterschiedlicher Variablen auf die Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6

Auch bei der Produktgruppe B5/B6 (Abbildung 92) zeigen sich gut bestimmte Korrelationen zwischen den Quantilen der Siebanalyse. Die Korrelation zwischen Temperatur und Druck im Hackschnitzelkocher ist mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.9 deutlicher als bei der Produktgruppe B4. Die spezifische Stromaufnahme im Defibrator ist wieder negativ mit den Quantilen der Siebanalyse korreliert. Die Korrelation ist etwas deutlicher als bei der Produktgruppe B4. Eine Erhöhung der Energie bei der Zerfaserung bringt also kleinere Fasergrößen. Ebenfalls zeigt sich die bereits bei B4 diskutierte deutliche negative Korrelation zwischen Fasermasse und spezifischer Stromaufnahme. Bei hohen Faserdurchsätzen wird also vermutlich der Mahlspalt aufgefahren um den nötigen Durchsatz zu erreichen. Ebenfalls vergleichbar zu B4 ist die positive Korrelation zwischen Fasermasse und den Größen der Siebanalyse, die durch den Zusammenhang zwischen Fasermasse und spezifischer Stromaufnahme erklärbar sein könnte.

Die negative Korrelation zwischen Kochzeit und Fasermasse ist auch bei der Produktgruppe B5/B6 zu erkennen.

Im Gegensatz zu der Variante B4 finden sich bei der Auswertung des Datensatzes zur Variante B5/B6 gut bestimmte positive Korrelationen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den Quantilen der Siebanalyse. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitfähigkeit mit größeren Fasergrößen steigt. Umgekehrt führen also kleinere Werte in den Quantilen der Siebanalyse zu einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit.

Dieser Effekt war bei der Variante B4 im Korrelationsdiagramm nicht signifikant, konnte aber bei einem Vergleich der Teilmengen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit in gleicher Logik gezeigt werden (Abbildung 87).

Während bei der Variante B4 zumindest ein schwach bestimmter Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den Größen Druck, Kochzeit und Severity-Factor, die für die Plastifizierung der Hackschnitzel im Kocher stehen, zu vermuten war, besteht bei der Variante B5/B6 kein relevanter Zusammenhang mit diesen Größen.

Die Daten zur Laufzeit der Segmente wurden nur für einen Teil der Beobachtungen erhoben. Es zeigen sich keine Zusammenhänge zur Wärmeleitfähigkeit oder den Fasergrößen. Ein positiv korrelierter Zusammenhang besteht jedoch zur spezifischen Stromaufnahme. Dies bedeutet, dass mit voranschreitender Laufzeit der Segmente die spezifische Stromaufnahme steigt, was vermutlich daran liegt, dass mit voranschreitender Abstumpfung der Segmente die Mahlscheiben zusammengefahren werden müssen, um einen adäquaten Faseraufschluss zu erreichen. Eine konsequente Protokollierung der Laufzeit der Segmente wäre wünschenswert und könnte dann auch in weiterführende Auswertungen mit einbezogen werden.

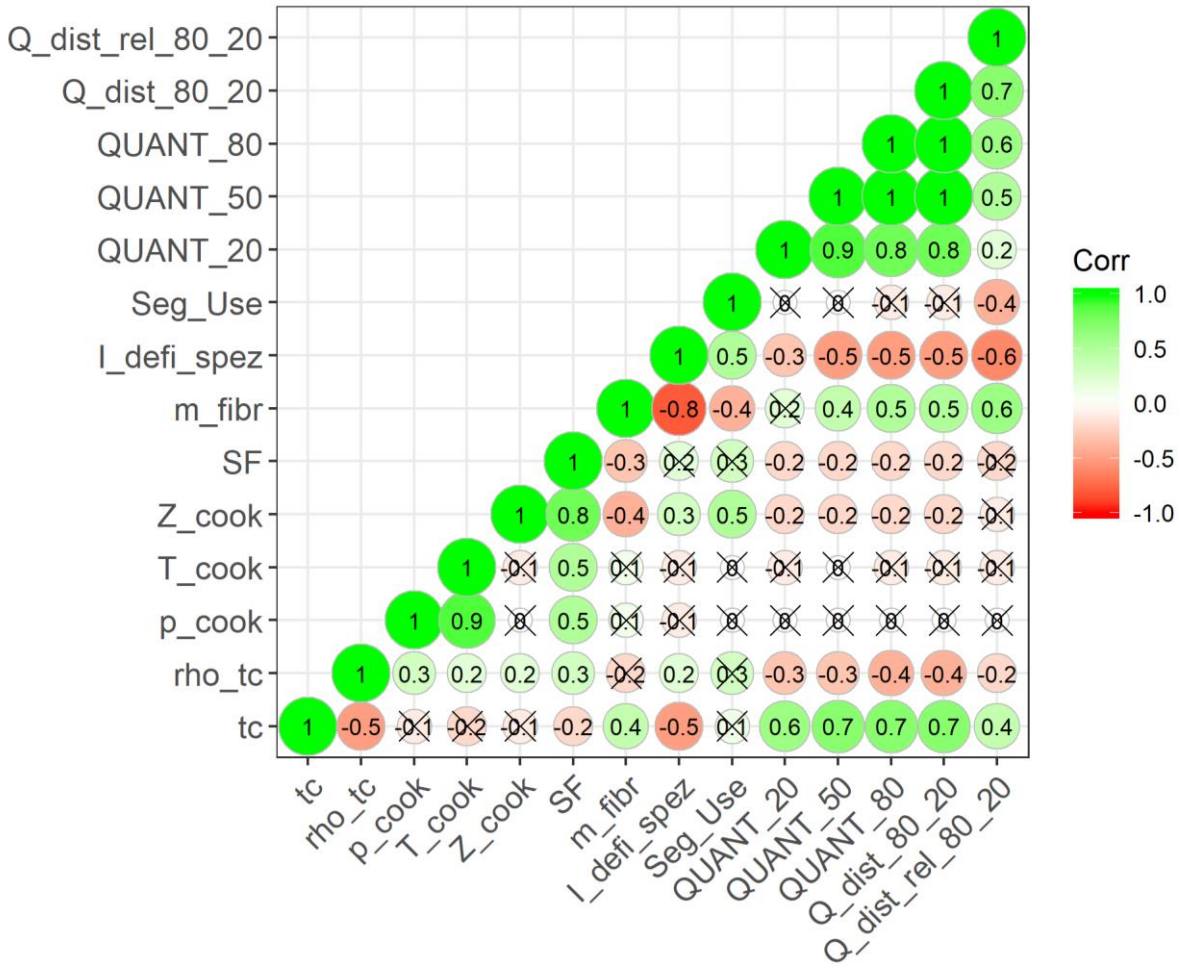


Abbildung 92 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Variablen der Datenbasis B5/B6, Signifikanzniveau 0.05, nicht signifikante Korrelationen sind ausgekreuzt

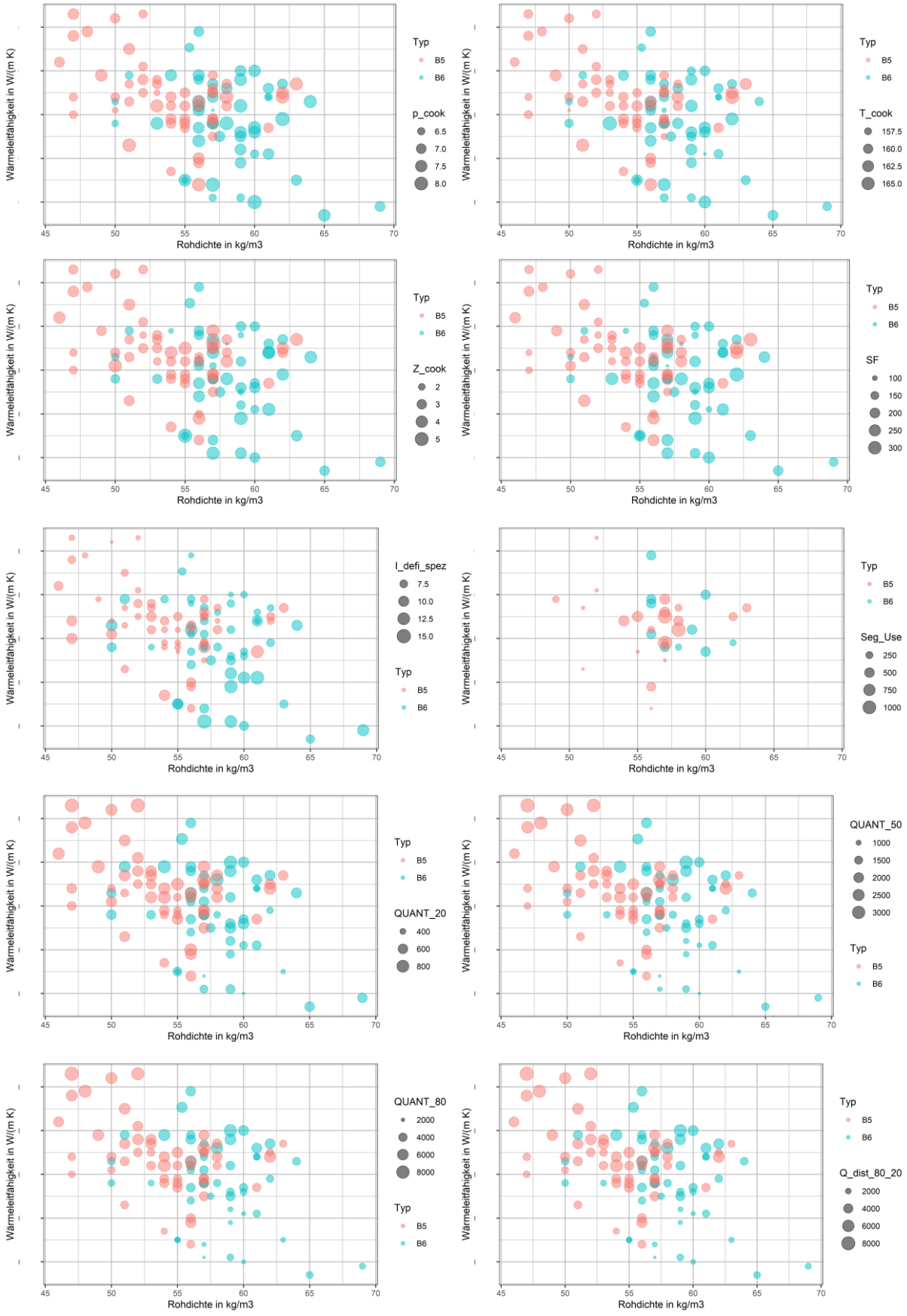


Abbildung 93 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B5/B6), Größe der Datenpunkte gemäß dritter Variablen

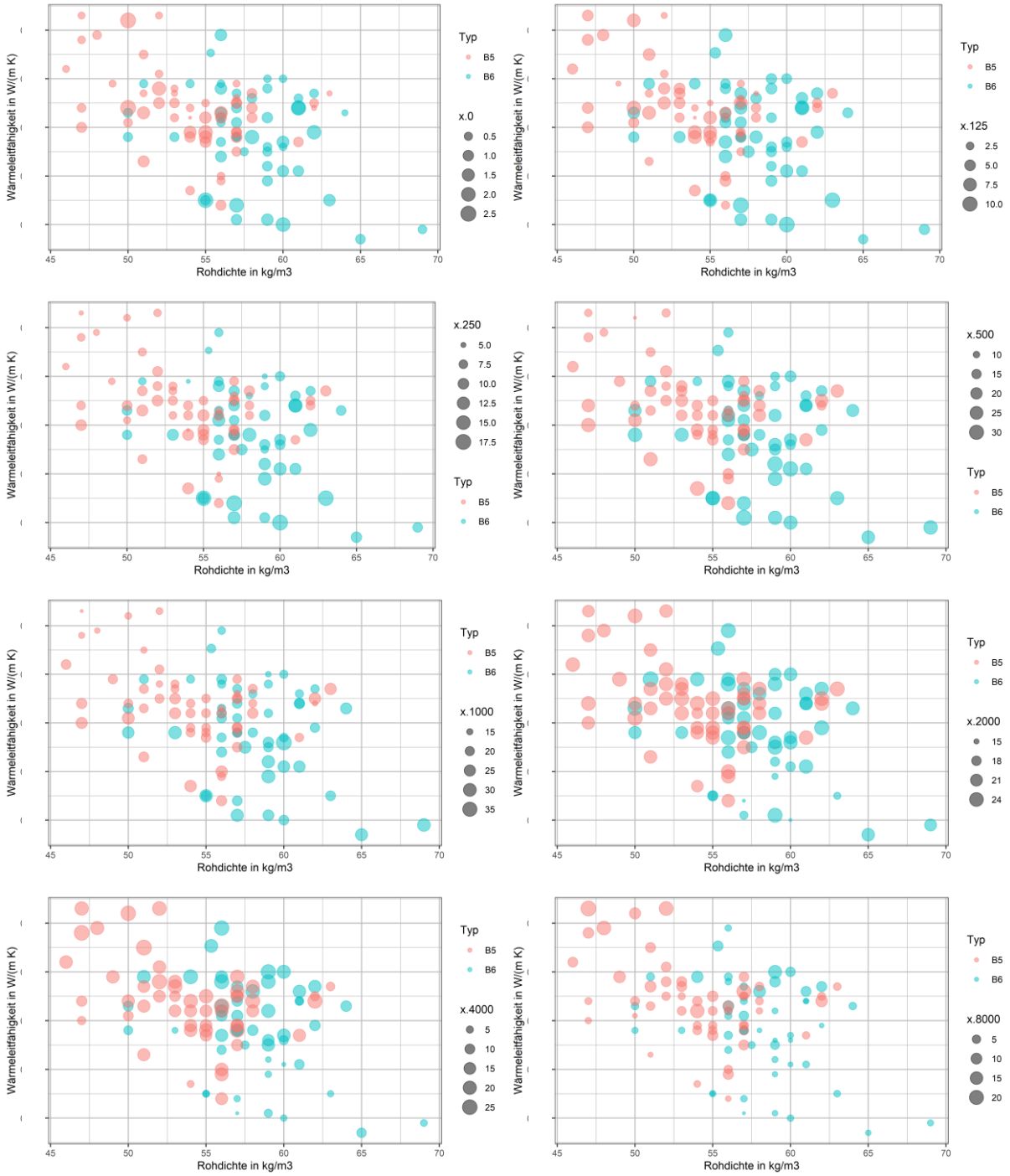


Abbildung 94 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte (B5/B6), Größe der Datenpunkte gemäß Massenanteil der Siebrückstände in den Fraktionen von 0 (Staubanteil) – 8000 µm.

In Abbildung 93 ist wieder die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Rohdichte aufgetragen. Die Größe der Datenpunkte ist auf eine dritte Variable skaliert. Zusätzlich sind die Produkte B5 und B6 durch farblich unterschiedliche Punkte gekennzeichnet. Im Korrelationsdiagramm waren keine signifikanten Korrelationen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den Größen Druck, Temperatur und Kochzeit zu erkennen. Bei einer Betrachtung der Einzelwerte ist zumindest ein gewisser Unterschied zwischen den Produkten B5 und B6 erkennbar, wobei bei der Gruppe B6 tendenziell ein höherer Druck und Temperatur gefahren wird. Gleiches gilt etwas ausgeprägter für den Severity-Factor. Die Korrelation

zwischen Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Stromaufnahme kommt ebenfalls gut heraus und ist insbesondere zwischen den Produktgruppen B5 und B6 differenziert. Die guten Korrelationen zwischen den Quantilen der Siebanalyse und der Wärmeleitfähigkeit zeigen sich ebenfalls. Wobei insbesondere das 50 %-Quantil, das 80 %-Quantil und das Distanzmaß der Verteilung gut differenzieren.

In Abbildung 94 sind in gleicher Logik die Massenanteile der Siebfraktionen skaliert. Dabei ist zu erkennen, dass Produkte mit niedriger Wärmeleitfähigkeit insbesondere mehr Anteile in den Fraktionen von 250 µm – 1000 µm aufweisen sowie weniger Anteile in den Fraktionen > 4000 µm.

VIII.1.2.2 Auswertungen zu Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6

Die Aufteilung in Subgruppen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit erfolgte für die Produktgruppe B5/B6 nach folgenden Kriterien.

Die Gruppe mit hoher Wärmeleitfähigkeit besteht aus Proben mit einer Wärmeleitfähigkeit > 0.0375 W/(m K). In dieser Gruppe verblieben 30 Beobachtungen.

Die Gruppe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit besteht aus Proben mit einer Wärmeleitfähigkeit < 0.0365 W/(m K). In dieser Gruppe verblieben 19 Beobachtungen.

Abbildung 95 zeigt die Mittelwerte und das Konfidenzintervall für ausgewählte Variablen der Variante B5/B6 nach Aufteilung in die genannten Teilmengen.

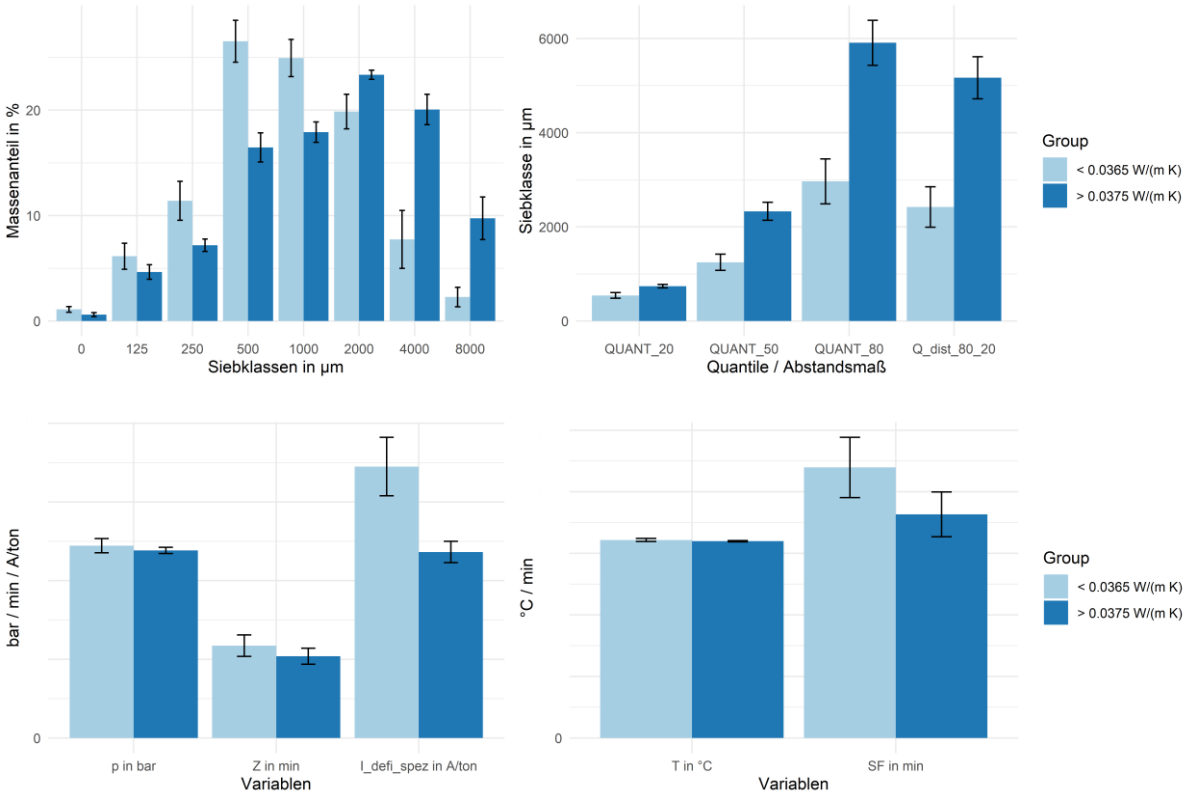


Abbildung 95 Mittelwerte und Konfidenzintervall ausgewählter Variablen der Variante B5/B6, für zwei Teilmengen mit hoher (λ > 0.0370 W/(m K), N = 23) und niedriger (λ < 0,036 W/(m K), N = 33) Wärmeleitfähigkeit

Bei einem Vergleich der Verteilung der Siebklassen in den Teilmengen der Variante B5/B6 fällt auf, dass die Teilmengen mit hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit deutlicher voneinander differenziert sind als bei der Variante B4. Die Teilmenge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit zeigt das Maximum der Verteilung in den Klassen von 500 – 1000 µm und ist rechtsschief. Die Teilmenge mit hoher Wärmeleitfähigkeit hat das Maximum bei 2000 µm und ist linksschief. Ebenfalls deutlich differenziert sind die Quantile der Siebklassen. Signifikante Unterschiede bestehen zwischen dem 50 %-Quantil, dem 80 %-Quantil und dem Distanzmaß zwischen dem 80%- und 20 %-Quantil.

Obwohl die Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem Severity-Factor bei einer Auswertung der Grundgesamtheit von B5/B6 nur sehr schwach ist, zeigt sich bei einem Vergleich der Teilmengen ein recht deutlicher Unterschied. Die Teilmenge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit hat einen niedrigeren Severity-Factor.

Der insgesamt deutlichste Unterschied ist in der spezifischen Stromaufnahme des Defibrators zu erkennen. Hier hat die Teilmenge mit niedriger Wärmeleitfähigkeit eine deutlich höhere spezifische Stromaufnahme als die Varianten mit hoher Wärmeleitfähigkeit. In den Faseraufschluss geht also mehr Energie.

Wie bei der Variante B4 bestehen auch bei der Variante B5/B6 keine Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit von Matten die mit bestimmten Segment-Typen hergestellt wurden. Insgesamt wurden drei Segmente von drei unterschiedlichen Herstellern verwendet.

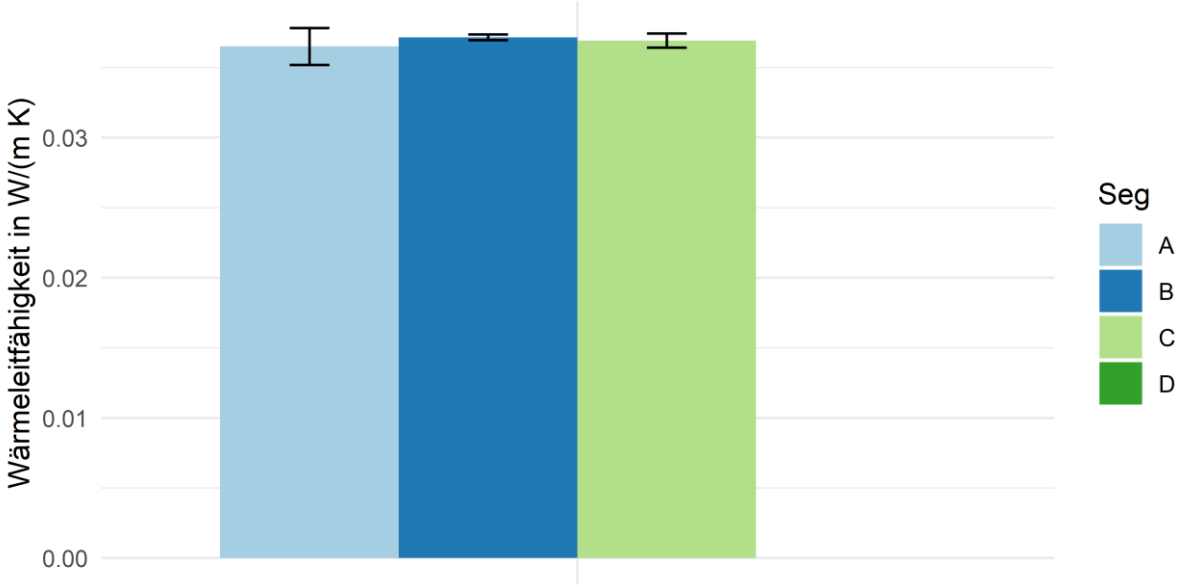


Abbildung 96 Wärmeleitfähigkeit der Variante B5/B6, unterschieden nach Segment-Herstellern A - D

VIII.1.2.3 Hauptkomponentenanalyse der Variante B5/B6

Das System zur Auswahl der Variablen in zwei Subgruppen folgt dem Vorgehen bei der Variante B4 (Tabelle 25).

Tabelle 29 zeigt den Scree-Plot, den Bi-Plot und die Ladungsmatrix für die Variante B5/B6. Es ist kein eindeutiger Knick im Scree-Plot zu erkennen. Nach dem Kaiser-Kriterium werden die ersten drei Hauptkomponenten als relevant eingestuft. In der ersten Hauptkomponente liegen die stärksten Ladungen der Fasergrößen und der Wärmeleitfähigkeit. Diese Größen sind im Bi-Plot gleichsinnig angeordnet. Senkrecht dazu stehen in der zweiten Hauptkomponente die Ladungen von Druck und Temperatur im Kocher. Die spezifische Stromaufnahme im Defibrator und die Fasermasse laden am stärksten in der dritten Hauptkomponente. Gegenüber der Auswertung der gleichen Gruppe in Variante B4 laden die Variablen in den Hauptkomponenten insgesamt differenzierter.

Tabelle 29 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 1

B5/B6	2.06	1.45	1.13	0.93	0.83	0.57	0.43	0.38	0.33	0.13
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
m_fibr	0.31	-0.25	0.49	0.27	0.10	-0.21	0.50	0.27	0.37	0.07
p_cook	-0.02	-0.63	-0.25	-0.06	-0.14	0.04	0.29	0.29	-0.59	-0.02
T_cook	-0.03	-0.62	-0.17	-0.17	-0.31	0.05	-0.23	-0.27	0.58	-0.01
Z_cook	-0.18	0.13	-0.40	0.75	-0.39	-0.23	0.04	0.07	0.09	0.02
l_defi_spez	-0.34	0.24	-0.39	-0.36	0.03	0.12	0.66	0.08	0.32	0.00
QUANT_20	0.38	0.06	-0.42	-0.18	0.20	-0.24	-0.32	0.63	0.21	-0.03
QUANT_50	0.45	0.02	-0.29	0.00	0.11	-0.08	0.15	-0.39	-0.09	0.72
QUANT_80	0.45	0.02	-0.23	0.04	0.12	-0.17	0.21	-0.41	-0.06	-0.69
rho_tc	-0.24	-0.25	-0.19	0.37	0.78	0.28	-0.07	-0.06	0.10	-0.01
tc	0.40	0.11	-0.04	0.17	-0.23	0.85	0.04	0.15	0.07	-0.05

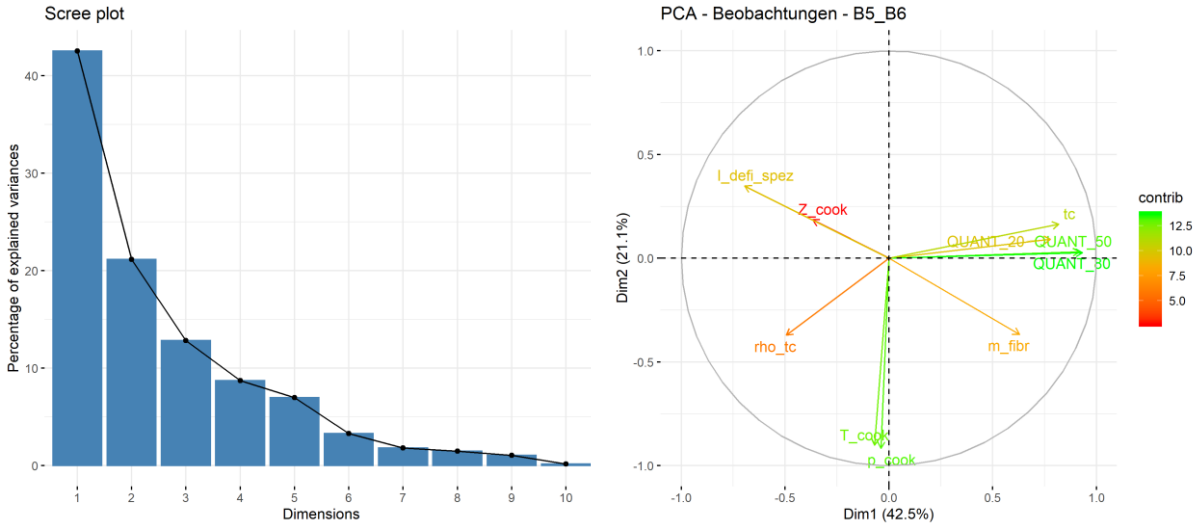
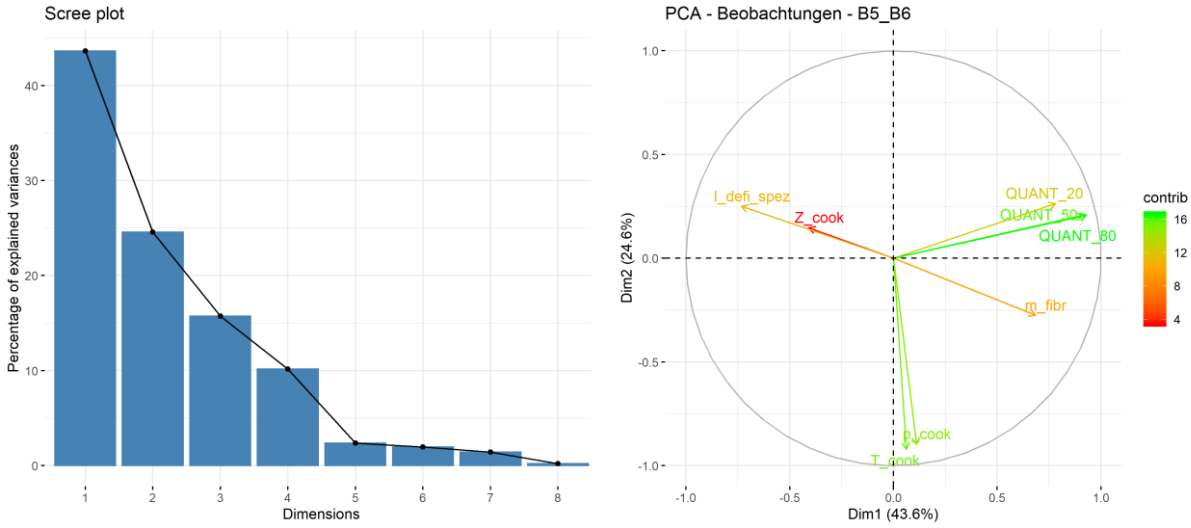


Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Subgruppe 2. Die Verschiebungen zu den Ergebnissen der Subgruppe 1 sind wieder gering. Interessant ist diesmal die Korrelation zwischen den Hauptkomponenten und der Wärmleitfähigkeit (Abbildung 97).

Tabelle 30 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 2

B5/B6	1.87	1.40	1.12	0.90	0.43	0.40	0.33	0.13
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
m_fibr	0.37	-0.20	0.51	0.23	0.55	-0.18	0.42	0.08
p_cook	0.06	-0.64	-0.30	0.01	0.36	-0.23	-0.56	-0.02
T_cook	0.03	-0.66	-0.25	-0.06	-0.33	0.27	0.56	-0.01
Z_cook	-0.22	0.10	-0.37	0.89	0.04	-0.06	0.12	0.02
l_defi_spez	-0.39	0.18	-0.41	-0.36	0.63	0.09	0.34	0.01
QUANT_20	0.42	0.19	-0.41	-0.16	-0.17	-0.71	0.24	-0.02
QUANT_50	0.49	0.15	-0.27	0.02	0.09	0.40	-0.10	0.70
QUANT_80	0.50	0.15	-0.20	0.06	0.15	0.40	-0.05	-0.71



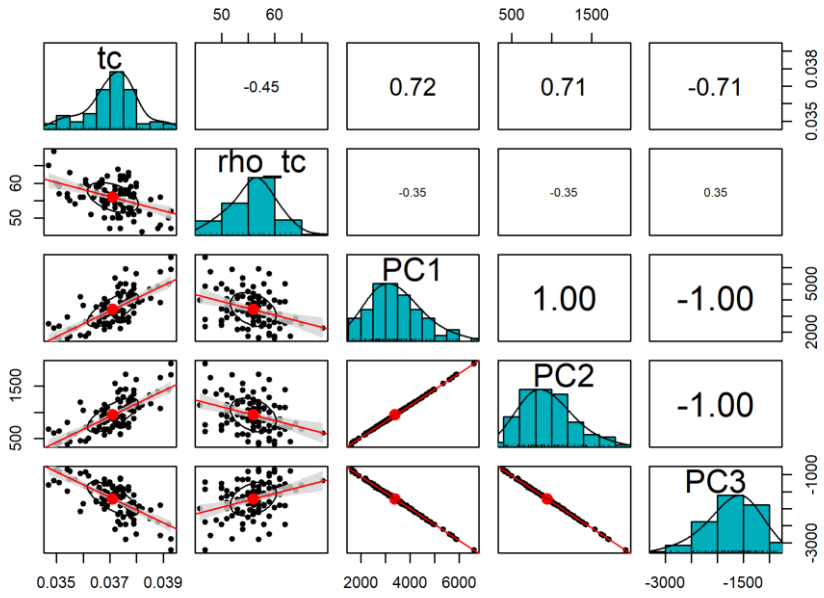


Abbildung 97 Korrelationsdiagramm, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B5/B6, gemäß Tabelle 30

Entgegen den Ergebnissen in Variante B4 lassen sich bei der Variante B5/B6 signifikante Korrelationen zwischen den ersten drei Hauptkomponenten und der Wärmeleitfähigkeit aufstellen.

Ein Vergleich mit der Korrelationsmatrix in Abbildung 92 zeigt, dass der Korrelationskoeffizient zwischen der Wärmeleitfähigkeit und PC1 mit 0.72 im Bereich der Korrelationen der Wärmeleitfähigkeit zu den einzelnen Fasergrößen liegt. Während zu Druck und Temperatur im Kocher gemäß Abbildung 92 keine signifikanten Korrelationen nachweisbar sind, zeigt sich eine Korrelation der Wärmeleitfähigkeit zu PC2, die stark von Druck und Temperatur beeinflusst ist. Auch die Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und PC3 ist auf einem insgesamt höheren Niveau als die Korrelationen zu den dort dominant repräsentierten Einzelparametern Kochzeit, spezifische Stromaufnahme und Fasermasse.

Analog zur Variante B4 wird nun auch bei B5/B6 die Anzahl der Varianten reduziert. Die Ergebnisse der Subgruppe 3 für die Variante B5/B6 zeigt Tabelle 31.

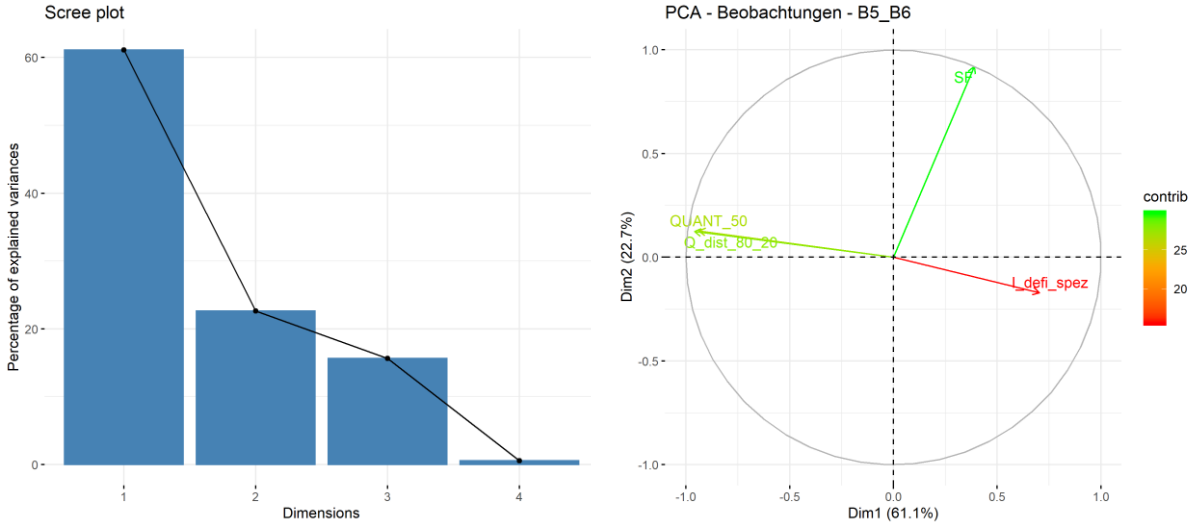
Die ersten beiden Hauptkomponenten erklären ca. 84 % der Varianz der Daten. In der ersten Hauptkomponente laden die Fasergrößen am stärksten. In der zweiten Hauptkomponente lädt der Severity-Factor und in der dritten Hauptkomponente die spezifische Stromaufnahme im Defibrator.

Entgegen den Ergebnissen bei der Variante B4 zeigen sich bei der Variante B5/B6 auch bei der reduzierten Datenbasis gute Korrelationen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den ermittelten Hauptkomponenten (Abbildung 98). Die Fasergrößen QUANT_50 und Q_dist_80_20 sind in der ersten Hauptkomponente eher der spezifischen Stromaufnahme gegenübergestellt. Dies ist plausibel und screent vermutlich den Unterschied zwischen der Faserproduktion B5 und B6. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Wärmeleitfähigkeit und PC1 ist wieder auf dem Niveau der Korrelationen zu den einzelnen Fasergrößen.

Der Severity-Factor steht relativ unabhängig in der zweiten Hauptkomponente und zeigt damit, dass die Intensität der Hackschnitzelkochung eine weitere unabhängige Größe darstellt die in der Datenbasis gut differenziert ist und mit einem Korrelationskoeffizient von 0.70 zur Wärmeleitfähigkeit einen Zusammenhang ausweist, der in dieser Güte in den Einzelkorrelationen nicht nachweisbar ist (vgl. Abbildung 98).

Tabelle 31 Ladungsmatrix und Plots für die Variante B5/B6, Gruppe 3

B5/B6	1.56	0.95	0.79	0.15
	PC1	PC2	PC3	PC4
SF	0.25	0.97	-0.07	0.01
I_defi_spez	0.45	-0.18	-0.87	0.06
QUANT_50	-0.60	0.13	-0.39	-0.69
Q_dist_80_20	-0.61	0.13	-0.29	0.72



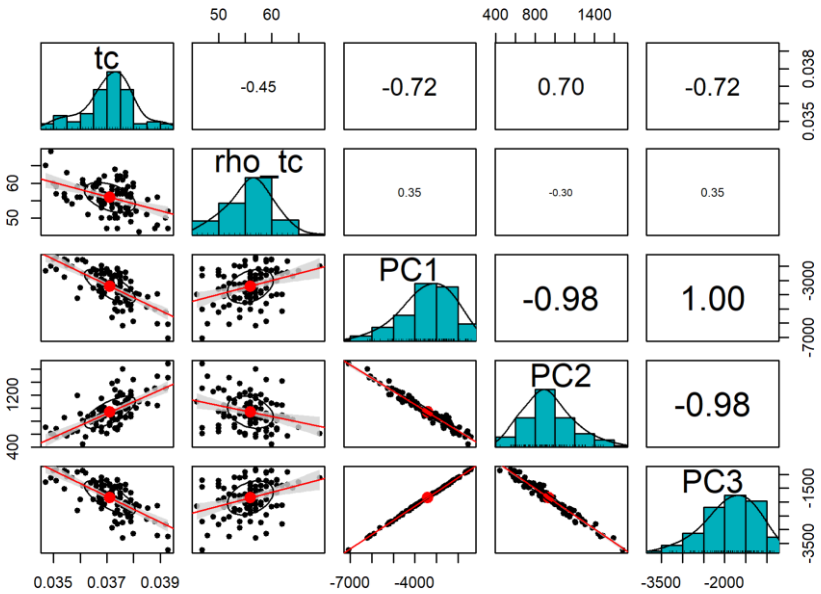


Abbildung 98 Korrelationsdiagramm, tc, rho_tc und Hauptkomponenten für die Variante B5/B6, gemäß Tabelle 31

VIII.1.2.4 Rohdichteprofile

Bislang war bekannt, dass Platten aus dem Trockenverfahren mit höherer Rohdichte und größeren Dicken ein Rohdichteprofil über der Plattendicke aufweisen, d. h. gegenüber der mittleren Rohdichte der Platte besteht eine höhere Rohdichte in den Randbereichen und eine geringere Rohdichte in der Mittellage. Das Rohdichteprofil entsteht im Wesentlichen während der Verdichtung des zunächst lose gestreuten Faserkuchens und wird umso ausgeprägter, je schneller die Verdichtungsgeschwindigkeit und je größer der Unterschied zwischen der Dicke des Faserkuchens und der Dicke der fertigen Platte ist.

Die durchgeführte Untersuchung an Platten aus dem Trockenverfahren im Rahmen der initialen Beprobung zeigte bei der Variante B3 mit einer mittleren Rohdichte ca. 170 kg/m^3 ein schwach ausgeprägtes Rohdichteprofil. Bei der Variante B4 mit einer mittleren Rohdichte von ca. 105 kg/m^3 war kein Rohdichteprofil feststellbar (Abbildung 39).

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde zunächst davon ausgegangen, dass die flexiblen Dämmstoffmatten mit nochmals reduzierter Rohdichte voraussichtlich ebenfalls kein signifikantes Rohdichteprofil aufweisen.

Um diese Annahme zu überprüfen wurde an einigen exemplarischen Matten das Rohdichteprofil durch Slicen der Dämmstoffmatten und vermessen der Schichten ermittelt.

Die Ergebnisse zeigt Abbildung 99. Wider Erwarten zeigen sich auch bei den flexiblen Matten relativ ausgeprägte Rohdichteprofile.

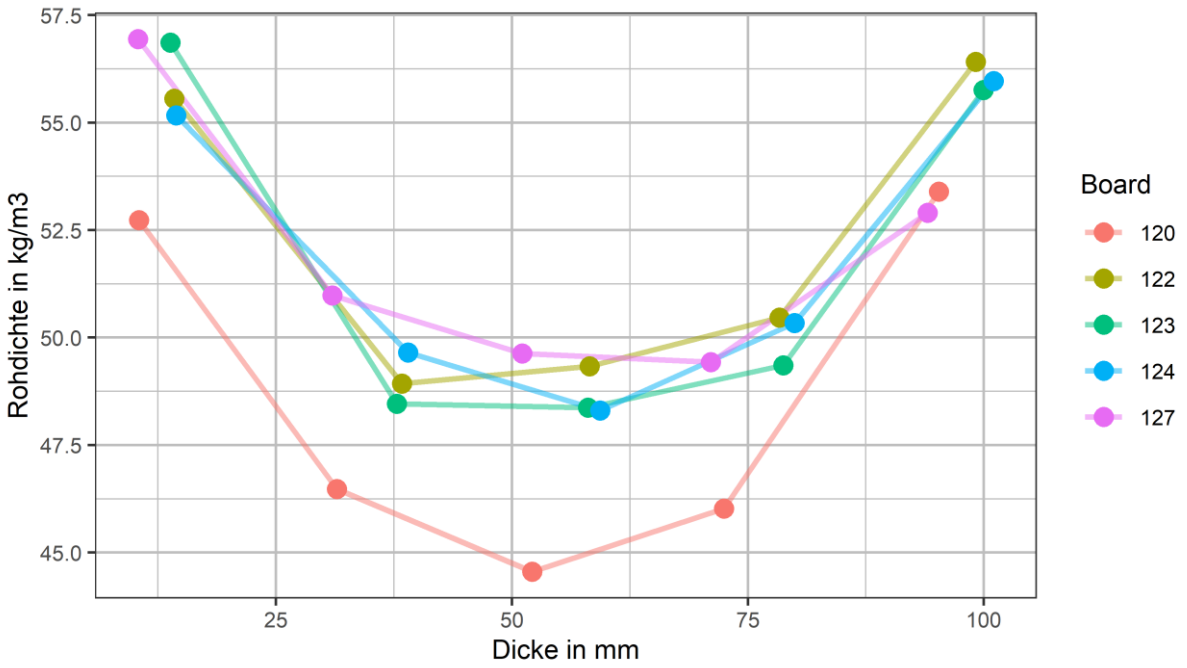


Abbildung 99 Exemplarische Rohdichteprofile an Matten aus der kontinuierlichen Beprobung zur Produktgruppe B5/B6

VIII.1.2.5 Einfluss von Severity-Factor und spezifischer Stromaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit

Der Einfluss des Severity-Factor und der spezifischen Stromaufnahme (charakteristisch für die Mahlenergie) auf die Wärmeleitfähigkeit konnte in der Hauptkomponentenanalyse gut herausgestellt werden. Beide Parameter charakterisieren die Güte des Faseraufschlusses. Der Severity-Factor beeinflusst den Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel im Kocher, während die Mahlenergie den Aufschluss der Hackschnitzel in Einzelfasern und Faserbündel beeinflusst.

Um mögliche Zielwerte für die folgenden Industrieversuche abzuleiten, wurde anhand der Daten für die Produktgruppe B5/B6 die Wärmeleitfähigkeit als Flächenapproximation für die beiden Variablen SF und I_defi_spez zum Ansatz nachfolgender Gleichung dargestellt.

$$\lambda = A \cdot SF + B \cdot I_{defi,spez} + C \tag{12}$$

Um den Einfluss der zwischen B5 und B6 leicht unterschiedlichen mittleren Rohdichte zu kompensieren wurde die Auswertung für beide Produktgruppen getrennt sowie für die Grundgesamtheit B5/B6 gemeinsam durchgeführt. Die Koeffizienten A, B und C wurden für die untersuchten Teilmengen ermittelt. Ansichten der erstellten Flächengleichungen sind in Abbildung 100 und Abbildung 101 enthalten.

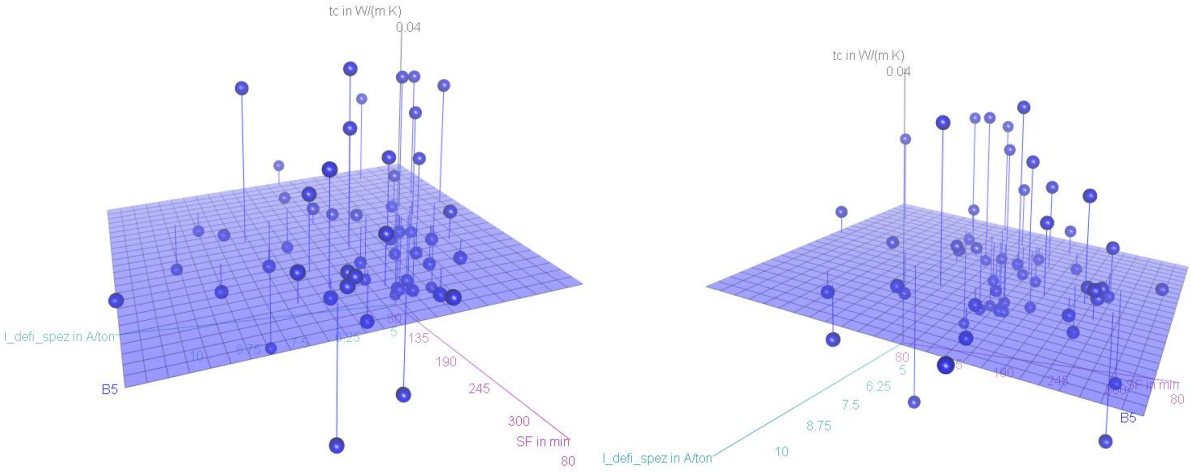


Abbildung 100 Unterschiedliche Ansichten der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B5

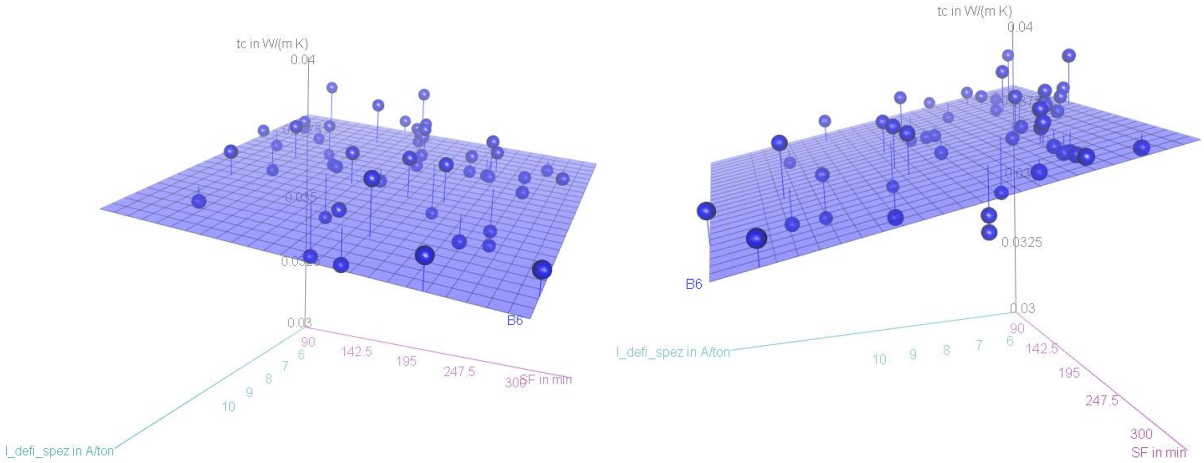


Abbildung 101 Unterschiedliche Ansichten der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B6

Im Vergleich zeigt sich, dass die Residuen bei der Variante B5 deutlich größer ausfallen als bei der Variante B6. Dies könnte in der insgesamt gröberen Faser der Variante B5 begründet sein, die damit eher zu inhomogeneren Faserstrukturen in der Matte führt. Die Wärmeleitfähigkeit könnte damit stärker von der räumlichen Anordnung der Fasern zueinander, als von den Fasergrößen an sich beeinflusst sein.

Tabelle 32 enthält das Ergebnis der Flächenapproximation für die gemeinsame Auswertung der Produktgruppe B5/B6. Grün markiert sind die Wertebereiche, die eine Wärmeleitfähigkeit < 0.0350 W/(m K) ergeben. Gelb markiert sind die Wertebereiche, die eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 0.0350 und 0.0360 W/(m K) ergeben. Orange markiert sind Wertebereiche die eine Wärmeleitfähigkeit zwischen 0.0360 und 0.0370 W/(m K) ergeben.

Tabelle 32 Ergebnis der Flächenapproximation λ = f(I_defi_spez, SF) für die Produktgruppe B5 und mögliche Kombinationen von T_cook und Z_cook zur Erreichung des jeweiligen Severity-Factors (Grün < 0.035 W/(m K), 0.035 W/(m K) < Gelb < 0.036 W/(m K), 0.036 W/(m K) < orange < 0.037 W/(m K))

T_cook in °C			λ in W/(m K)	I_defi_spez						
150	160	170								
Z in min	Z in min	Z in min	SF in min	8	10	12	14	16	18	20
1.7	0.9	0.4	50							
3.4	1.7	0.9	100							
5.1	2.6	1.3	150							
6.7	3.4	1.7	200							
8.4	4.3	2.2	250							
10.1	5.1	2.6	300							
11.8	6.0	3.0	350							
13.5	6.8	3.5	400							
15.2	7.7	3.9	450							
16.9	8.6	4.3	500							
18.5	9.4	4.8	550							
20.2	10.3	5.2	600							

Für den grünen Wertebereich < 0.0350 W/(m K) werden relativ hohe Werte des Severity-Factor und der spezifischen Stromaufnahme benötigt. Um die Kochzeit in einem vernünftigen Rahmen zu halten sind dafür hohe Temperaturen notwendig.

Unter Beachtung der jeweiligen Maximalwerte aus der Auswertung der Produktgruppe B5/B6 erscheint ein SF von ca. 450 und eine spezifische Stromaufnahme von ca. 15 A/ton realisierbar. Für die weiteren Industrieversuche wurde versucht diesen Wertebereich abzubilden und auch höherer SF zu erreichen. Auch der Einfluss von Temperatur und Kochzeit sollte separat abgebildet werden.

VIII.1.2.6 Training eines Random Forests für die Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit aus Prozessparametern und Faseranalyse

Random Forests sind ein maschinelles/statistisches Lernverfahren, das genutzt wird, um auf Basis vergangener Ereignisse zukünftige vorherzusagen, z.B. Wettervorhersagen anhand bekannter Wetterdaten. Hier soll anhand der Produktionsparameter und der Ergebnisse der Siebanalyse die Wärmeleitfähigkeit vorhergesagt werden, wobei der Wertebereich in Klassen unterteilt wird und lediglich die Klasse, nicht der konkrete Wert vorhergesagt wird. Die untersuchten zwei Klassen sind hier $tc > 0.03725$ und $tc \leq 0.03725$.

Ein Teil der Datensätze wird zum Training genutzt, anhand der verbliebenen wird die Güte der Vorhersage bewertet. Random Forests (Wälder) bestehen aus Entscheidungsbäumen. Für eine gegebene Datenmenge X ist die Klassifikation Y bekannt und eine Menge von Kenngrößen (Features) F für die Elemente von X. Wir erläutern den Trainingsschritt anhand einer Testmenge aus Äpfeln und Birnen, die manuell sortiert wurden. Zusätzlich wurden k Eigenschaften wie Farbe, Form, Wasser- oder Zuckergehalt gemessen. Nun wird eine maximale Anzahl von Bäumen m und eine maximale Baumtiefe $n<k$ gewählt. Wir wählen nun für jeden Baum n Eigenschaften und eine zufällige Teilmenge von X aus, z.B. n=2, Farbe und Form. Jede Verzweigung eines Baums entspricht einer Klassifikationsentscheidung anhand einer der gewählten Eigenschaften (z.B. rund = Apfel, weniger rund = Birne). Die der Entscheidung zugrundeliegenden Schwellwerte werden so optimiert, dass möglichst viele Elemente zusammengefasst werden, die zur selben Klasse gehören. Ein Baum könnte also entscheiden: rot sind Äpfel; grüne, runde Früchte ebenfalls; grüne längliche aber Birnen. Je nach Auswahl der Eigenschaften und der Schwellwerte kommen verschiedene Bäume u.U. zu verschiedenen Ergebnissen. In der Trainingsphase erhalten die Bäume höheres Gewicht, die die Trainingsdaten korrekt klassifizieren. Das so gewichtete Mittel liefert dann die Prognose für neue, unbekannte Daten.

Im Projekt wurden 88 Datensätze analysiert. Ähnlich wie oben wurden folgende 13 Kenngrößen berücksichtigt. Die “primären”, direkt einstellbaren

- Segmenttyp (Standard oder Andritz)
- Typ (85 oder 86)
- T_cook
- p_cook
- Z_cook

- p_defi
- p_blow

und die nicht direkt beeinflussbaren, sekundären

- I_defi / m_fibr = I_defi_spez
- rho_tc und die
- Massenanteile
    - Q_250 (0µm < x < 250µm)
    - Q_1000 (0µm < x < 1000µm)
    - Q_4000 (0µm < x < 4000µm)
- QUANT_80 – QUANT_20 = Q_dist_80_20.

Der Algorithmus läuft 20 Mal, der Random Forest gibt wie wichtig jedes einzelne Feature für die Entscheidung ist, siehe Abbildung 102.

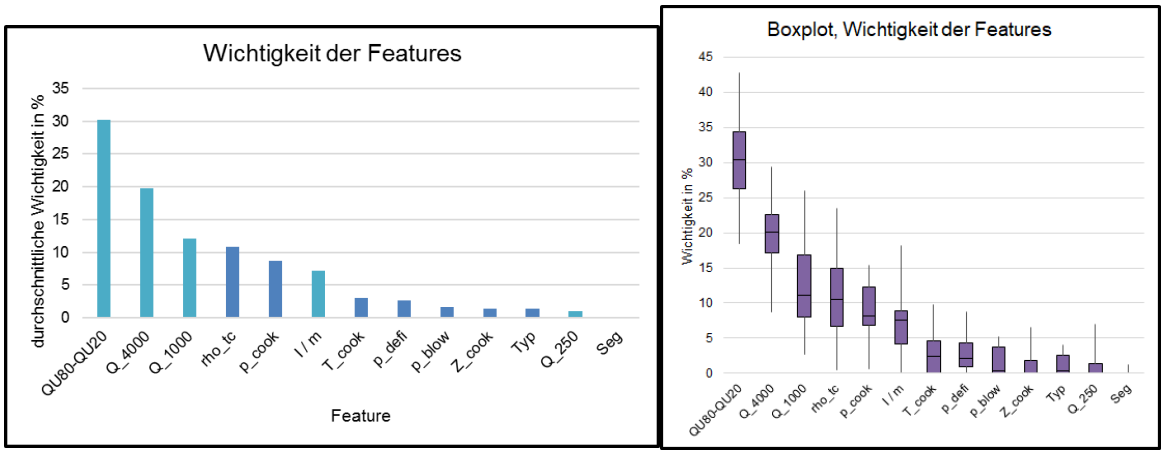


Abbildung 102 Durch den Random Forest ermittelter Einfluss der Kenngrößen.

Die Vorhersagegenauigkeit hängt davon ab, welche Features genutzt werden:

- Verwendung aller Features: 81.8 %
- Verwendung nur der primären Features: 60.6%
- Verwendung aller sekundären Features außer rho_tc: 74.5%
- Verwendung nur der aus der Siebanalyse abgeleiteten Features: 72.5%.

Daraus ergibt sich klar, dass die primären Features allein nicht ausreichen, um die Wärmeleitfähigkeit vorherzusagen. Die beiden wichtigsten primären Features sind T_cook (2.5%) und p_cook (8.7%). Eine klare positive oder negative Korrelation der Wärmeleitfähigkeit mit diesen Features ist nicht erkennbar. Da Druck und Kochzeit stark korreliert sind, betrachten wir das Produkt T_cook*p_cook. Dieses neue Feature ist etwas wichtiger als der Druck allein (8.9%). Eine klare Korrelation ist auch hier nicht erkennbar, siehe Abbildung 103, aber besonders hohe Werte für T_cook*p_cook führen stets zu geringer Wärmeleitfähigkeit und besonders niedrige Werte für T_cook*p_cook zu höherer Wärmeleitfähigkeit.

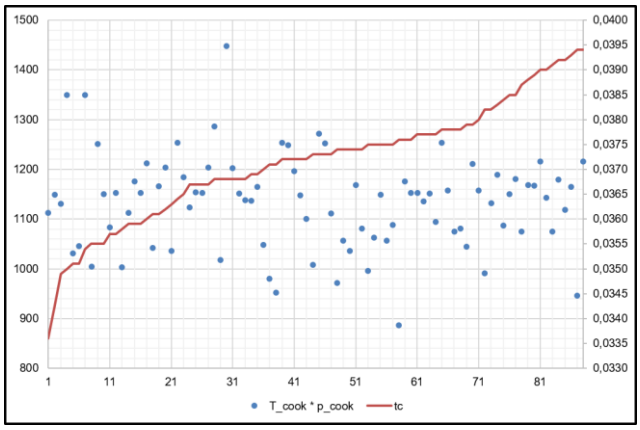


Abbildung 103 Korrelation der aggregierten primären Kenngröße T_cook*p_cook mit der Wärmeleitfähigkeit.

Weitere Aufbereitung der Siebanalysedaten führt zu einer noch genaueren Prognose: Verwendet man neben den primären Features und I_defi_spez Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung der empirischen Verteilung aus der Siebanalyse sowie den (Massen)anteil der “mittelgroßen” Fasern 1000 < x < 4000, dann steigt die Vorhersagegenauigkeit auf 84.8%. Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit positiv mit Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe aber negativ mit der Wölbung korreliert, siehe Abbildung 104. Für die Sieblinienverteilung ist die Wölbung stets positiv, d.h. die Verteilung “spitzer” als die Normalverteilung und die negative Korrelation heißt dann: Je spitzer die Sieblinienverteilung, desto besser die Wärmedämmung.

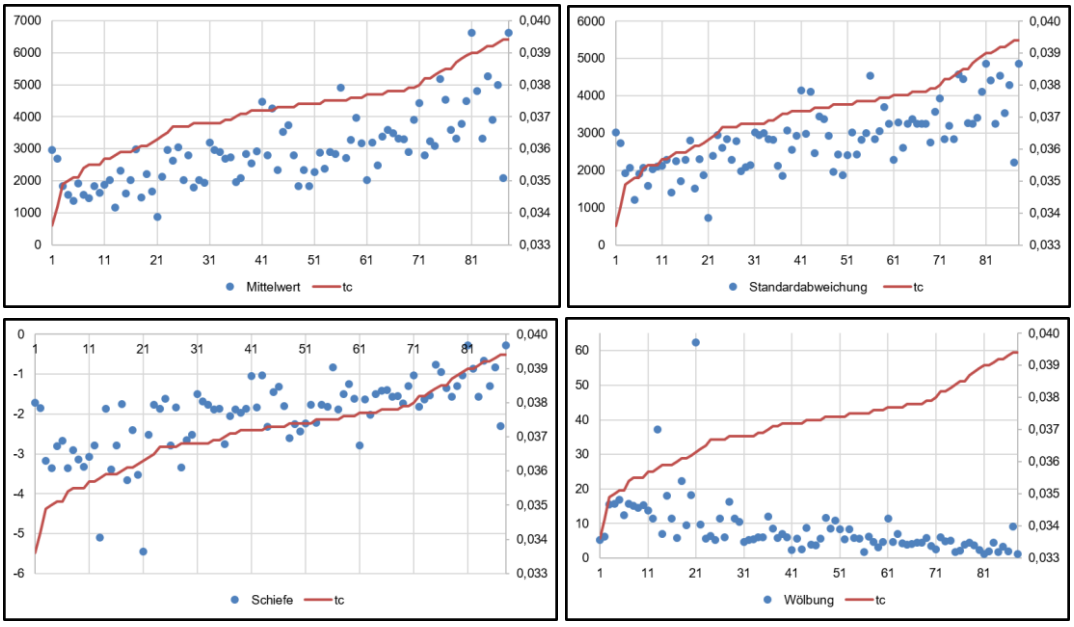


Abbildung 104 Korrelation der aus der Siebanalyse abgeleiteten Statistiken mit der Wärmeleitfähigkeit.

Betrachtet man 3 Wärmeleitfähigkeitsklassen (grün < gelb < rot) und die Korrelation der zwei wichtigsten Features, lässt sich aus Abbildung 105 folgende Hypothese ableiten: Gibt es nur wenige lange/große Fasern, ist die Sieblinie nur wenig gespreizt und die Wärmeleitfähigkeit geringer.

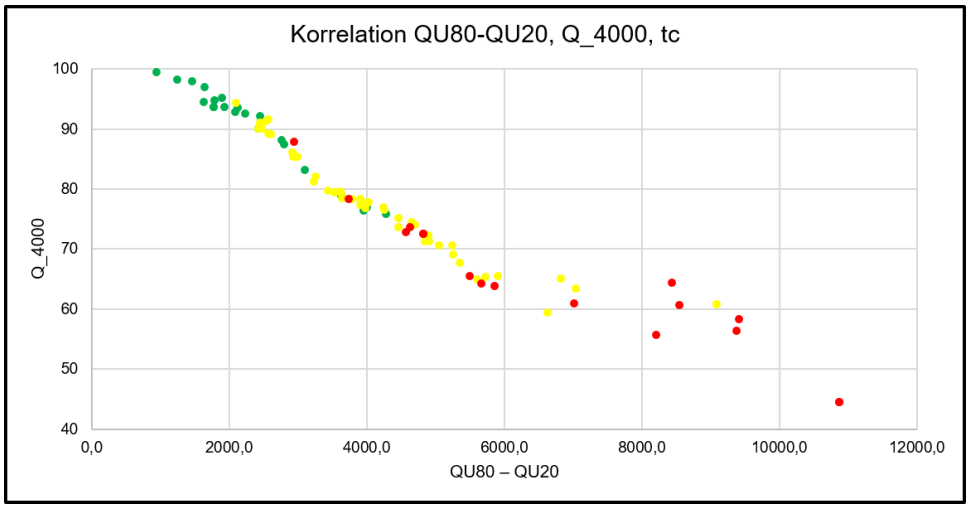


Abbildung 105 Korrelation von Q_4000 mit QU80-QU20 für geringe, mittlere, hohe Wärmeleitfähigkeit.

VIII.1.3 Zwischenfazit und Planung der Industrieversuche

Die im Folgenden beschriebenen Industrieversuche wurden mit flexiblen Matten durchgeführt, weil für diese Produktgruppe die deutlichsten Abhängigkeiten zwischen Produktionsparametern der Zerfaserung und der Mattenbildung sowie den physikalischen Größen der Produkte gefunden wurden.

In einem ersten Industrieversuch wurden zunächst lose Fasern mit einer systematischen Variation von Druck, Temperatur und Kochzeit hergestellt. Der Severity-Factor erreichte damit Werte von SF = 75 bis SF = 486. Die Varianten wurden hinsichtlich der Eigenschaften der losen Fasern und nach Herstellung von Dämmstoffmatten in einem Laborverfahren charakterisiert. Durch die kontrollierte Streuung in einem Laborverfahren sollte eine möglichst homogene Mattenbildung erzielt werden, um ggf. Unterschiede bzgl. des Einfluss der Fasergrößen bzw. der Zerfaserungsbedingungen besser abzubilden. Auch der Einfluss des Rohdichteprofils sollte durch die Untersuchung von gezielt schnell und langsam verdichteten Matten abgebildet werden.

In einem zweiten Industrieversuch wurden mit einer Variation des Severity-Factor von SF = 89 – 394 und einer spezifischen Stromaufnahme von 8 A/ton, Matten mit zwei unterschiedlichen Dichten hergestellt. An diesen Varianten wurden auch Rohdichteprofile ermittelt.

In einem dritten Industrieversuch war zunächst geplant einen nochmal verschärften Aufschluss mit einem SF von ca. 800 zu erreichen. Aufgrund von technischen Problemen konnte dies nicht umgesetzt werden. Der Severity-Factor erreichte einen Wert von SF = 369. Die spezifische Stromaufnahme war mit ca. 10 A/ton etwas höher als beim zweiten Industrieversuch. Im Weiteren wurde auch versucht, durch unterschiedliche Bandlaufgeschwindigkeiten das Rohdichteprofil zu beeinflussen und es wurde der Einfluss unterschiedlicher Mahlspalte in Kombination mit unterschiedlichen Dichten der Matten untersucht.

In einem abschließenden vierten Industrieversuch gelang es dann schließlich durch eine deutlich verlängerte Kochzeit einen gegenüber dem zweiten und dritten Industrieversuch deutlich höheren Severity-Factor von SF = 611 zu erreichen. Gleichzeitig wurde eine hohe spezifische Stromaufnahme im Defibrator von ca. 21 A/ton erreicht.

VIII.2 Industrieversuch I

In dem ersten Industrieversuch wurden wie in IV.1.3.1 beschrieben sechs Faservarianten unter systematischer Variation von Temperatur, Druck und Kochzeit hergestellt. Die realisierten Herstellparameter sind in Tabelle 33 zusammengestellt. Die spezifische Stromaufnahme im Defibrator konnte nicht bestimmt werden. Photographische Aufnahmen von Fasermustern zeigt Abbildung 106.

Tabelle 33 Herstellparameter Industrieversuch I

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr
-	in °C	in bar	in min	in min	in ton/h
LLF15	157	6.3	3	148	3
LLF16	157	6.3	4	197	3
LLF17	157	6.3	5	247	3
LLF18	167	9.5	3	291	3
LLF19	167	9.5	5	486	3
LLF20	147	4.8	3	75	3

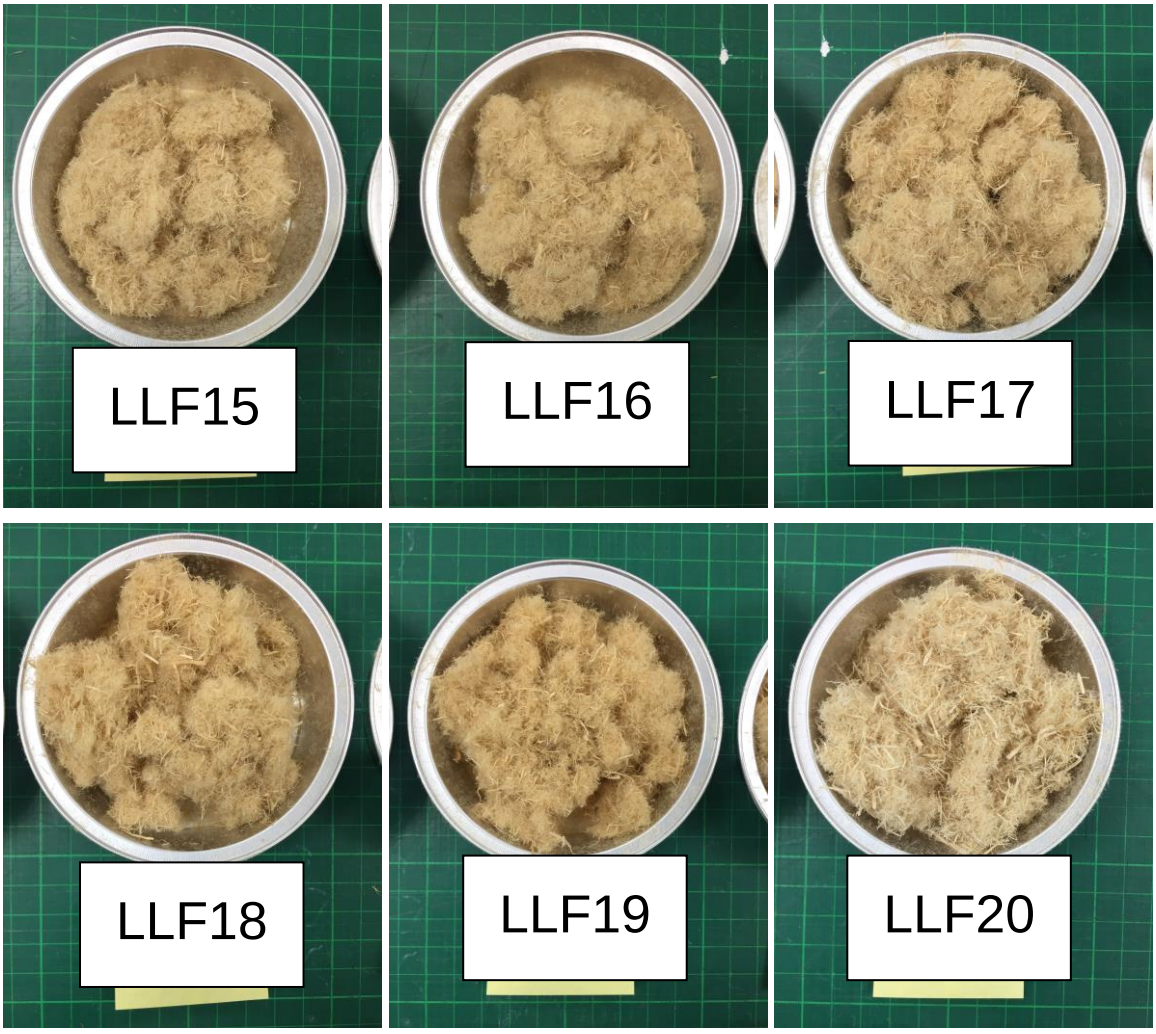


Abbildung 106 Fasermuster der Varianten LLF15 – LLF20 aus dem Industrieversuch I

Die Aufschlussbedingungen unterscheiden sich hinsichtlich des Severity Factor deutlich. Der schwächste Aufschluss in Variante LLF20 weist einen SF von 75 auf, während der intensivste Aufschluss in Variante LLF19 einen SF von 486 aufweist. Entsprechend zeigen sich auch leichte Farbveränderungen der zugeordneten Fasern. LLF20 ist bspw. deutlich heller als die Variante LLF19 (Abbildung 106).

Die Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Fasern wurde zunächst lose eingestreut mit einer Dichte von 50 kg/m^3 untersucht. An den Fasern wurden außerdem mit einem 2D-Scanner Längen und Breitenvermessungen sowie Siebanalysen durchgeführt.

Im Weiteren wurden aus den Faserkollektiven in einem Laborverfahren flexible Matten mit einer Zieldichte von 50 kg/m^3 hergestellt (IV.2.9). An diesen Matten wurde die Wärmeleitfähigkeit sowie teilweise der Strömungswiderstand und Dichteprofile untersucht.

Abbildung 107 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Proben bei einer Dichte von 50 kg/m^3 im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit an von Hand und lose eingestreuten Proben gleicher Dichte. Zunächst fällt auf, dass die Wärmeleitfähigkeit der Laborflex Proben durchgehend deutlich niedriger ausfällt als die Wärmeleitfähigkeit der von Hand und lose eingestreuten Muster. Auch die Reihung der Werte ist anders.

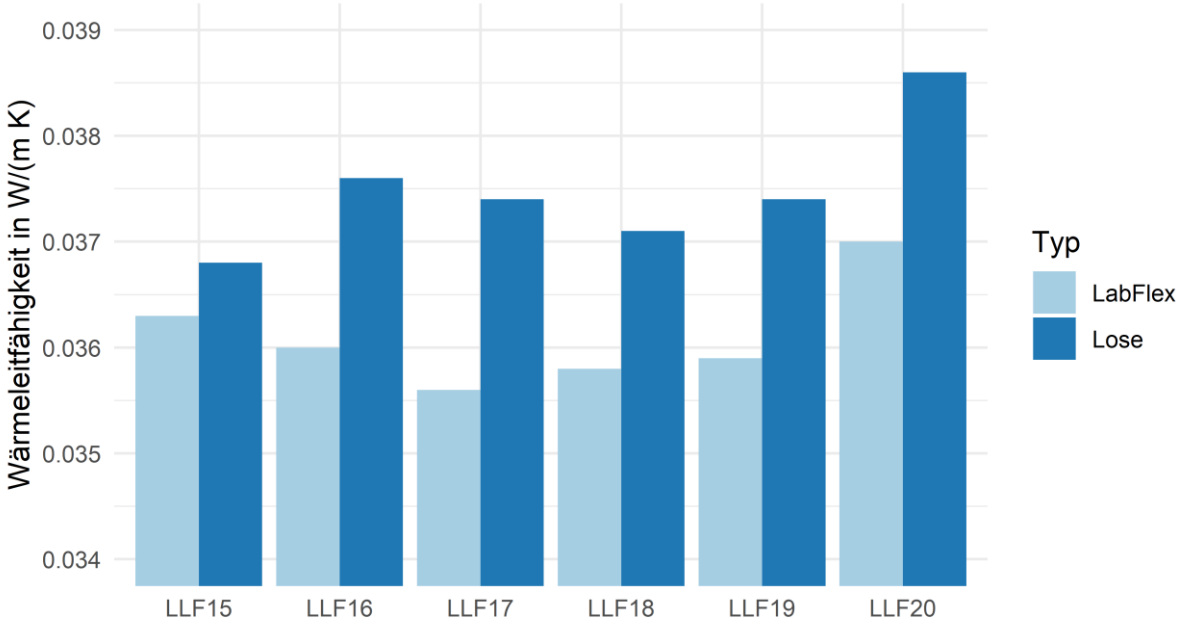


Abbildung 107 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern aus den Faserproben entsprechend Tabelle 33 bei 50 kg/m^3 – Laborflex vs. händisch lose eingestreute Fasern

Die Wärmeleitfähigkeit der Laborflex Proben nimmt in der Reihe LLF15 – LLF17 mit zunehmender Kochzeit von 3 – 5 min kontinuierlich ab, während die Ergebnisse an den von Hand und lose gestreuten Mustern keinen Trend über der Kochzeit liefert. Die zunehmende Kochzeit und damit der ansteigende Severity-Factor, sollte erwartungsgemäß zu einer besseren Plastifizierung der Hackschnitzel führen und einen besseren Faseraufschluss gewährleisten. Dieser Zusammenhang

konnte in der Auswertung der Produktionsdaten bereits nachgewiesen werden und zeigt sich nun auch deutlich anhand der Labormuster.

Ein Vergleich der Varianten LLF20 mit LLF15 und LLF18 zeigt den Einfluss von zunehmend intensiveren Druck- und Temperaturbedingungen im Hackschnitzelkocher bei ansonsten gleicher Kochzeit. Hier liefern die Varianten LLF15 (157°C/6,3 bar) und LLF18 (167°C/9,5 bar) relativ ähnliche Ergebnisse, wobei LLF15 eine etwas niedrigere Wärmeleitfähigkeiten ergibt, obwohl der Severity-Factor entsprechend niedriger ausfällt. Die geringste Intensität bei LLF20 mit 147°C/4,8 bar zeigt jedoch mit deutlichem Abstand die höchste Wärmeleitfähigkeit.

Die Variante LLF19 mit einer Kombination von hoher Temperatur und Druck im Kocher (167°C/9,5 bar) mit der längsten Kochzeit (5 min) zeigt keinen weiteren positiven Effekt auf die Wärmeleitfähigkeit.

Die Ergebnisse der Laborplatten legen nahe, dass ein Optimalbereich bezüglich der Hackschnitzelplastifizierung existieren könnte. Eine beliebige Verschärfung der Aufschlussbedingungen führt bei ansonsten gleichen Bedingungen des Aufschlusses, d. h. bei vergleichbarer Energie der Zerfaserung, nicht zwangsläufig zu niedrigeren Werten der Wärmeleitfähigkeit. Ob dies in den Fasergrößen oder auch in der Struktur der Fasermatrix begründet liegt, kann nicht abgeschätzt werden. Zumindest ist deutlich zu erkennen, dass offenbar ein Grenzwert hinsichtlich einer Mindestanforderung an die Intensität der Hackschnitzelplastifizierung existiert. Die Fasern aus der Variante LLF20 enthalten auch optisch mehr gröbere Fasern und einen größeren Feinanteil.

Um zu untersuchen, welche Streuung der Wärmeleitfähigkeit in der Variabilität des Laborprozesses liegt, wurden drei weitere Laborflex Proben mit der Faser LLF17 bei gleichen Herstellbedingungen und gleicher Zielrohdichte von 50 kg/m^3 hergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 108 dargestellt.

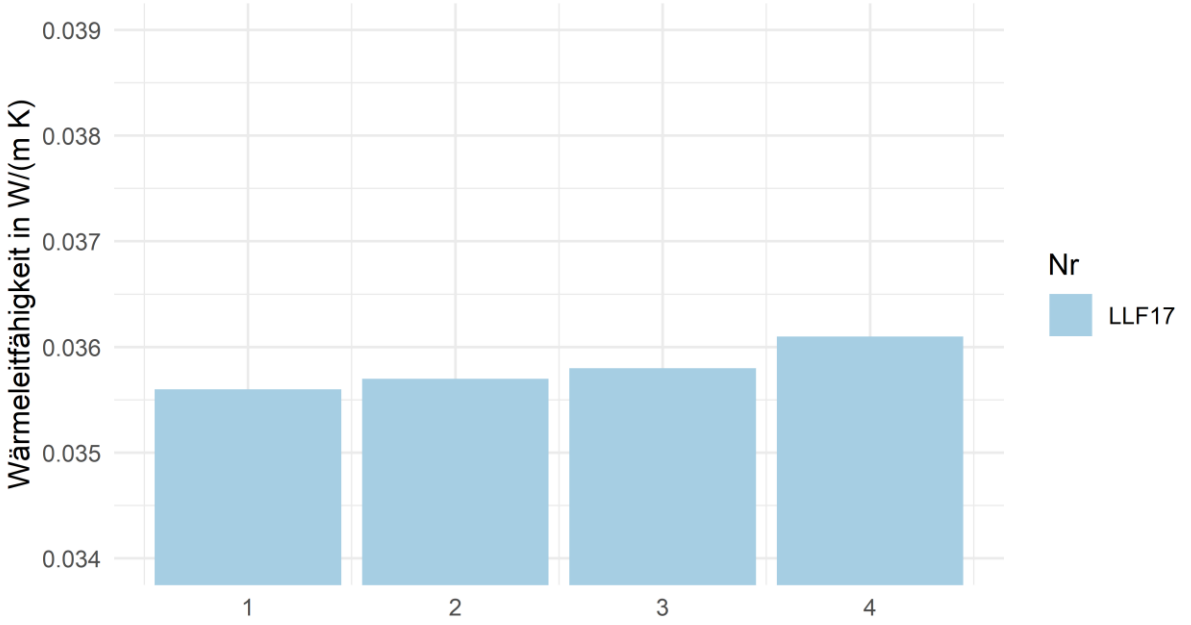


Abbildung 108 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern aus den Faserproben entsprechend Tabelle 33 – Fasertyp LLF17 mit wiederholter Herstellung bei gleicher Zieldichte (50 kg/m3)

Die erzielte Wärmeleitfähigkeit schwankt zwischen Werten von 0.0356 – 0.0361 W/(m K). Die ermittelten Unterschiede zwischen den Varianten LLF15 und LLF17 sowie zu LLF20 können daher als signifikant bewertet werden. Die Unterschiede zwischen LLF16, LLF17, LLF18 und LLF19 könnten im Bereich der Unsicherheit des Verfahrens liegen.

Eine Auswertung der Fasergrößen mittels 2D-Scanner zeigt für die Varianten LLF15 – LLF20 Verteilungen der geodätischen Länge zur geodätischen Breite entsprechend Abbildung 109.

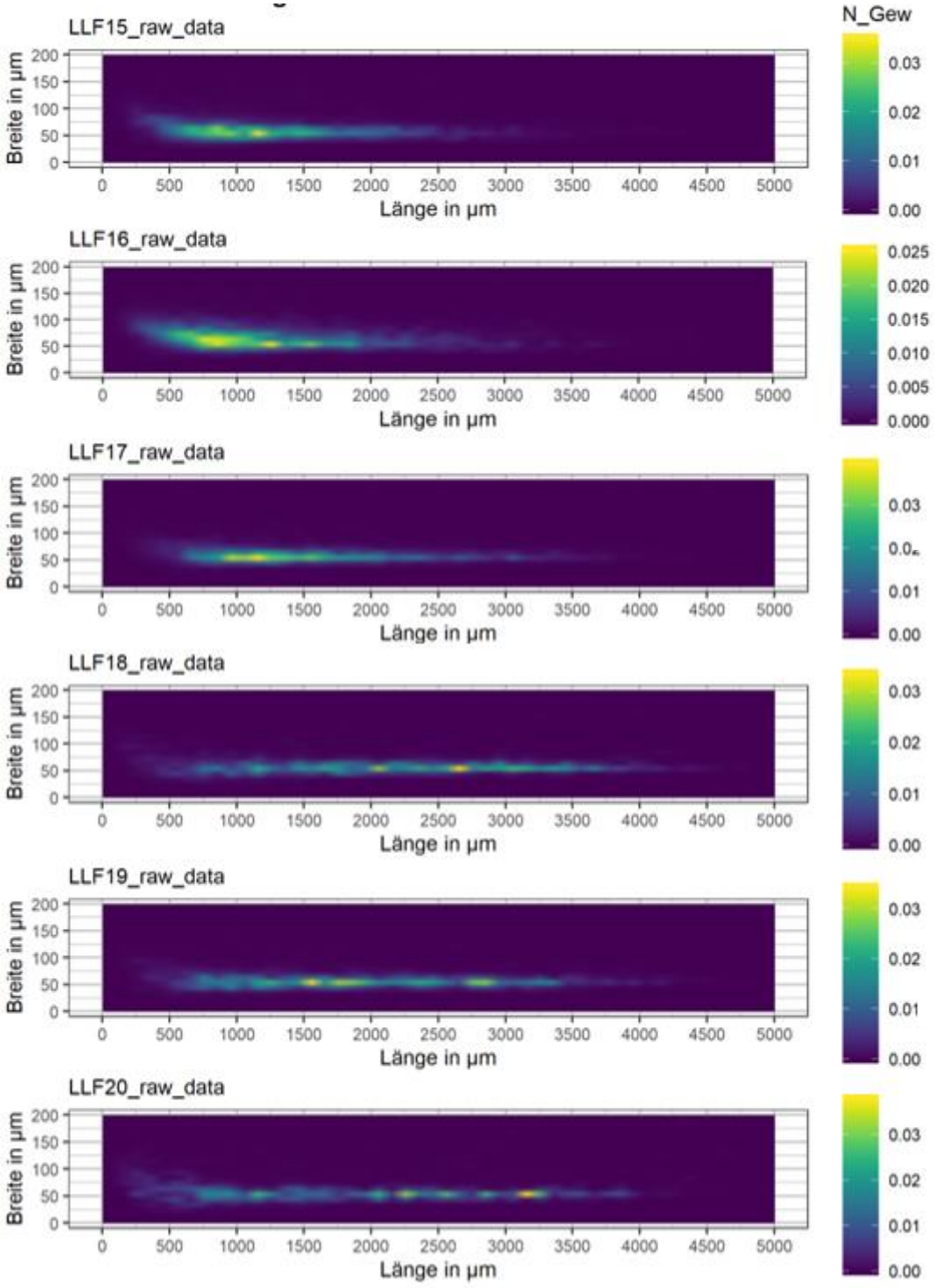


Abbildung 109 Faserstoffe aus Tabelle 33 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B)

Für die Reihe LLF15 – LLF17 zeigt sich mit ansteigender Kochzeit eine Reduzierung des Anteils kleinerer, dickerer Fasern und eine Verschiebung hin zu einer Verteilung mit einem definierten Maximum bei ca. 1000 – 1200 µm Faserlänge. Die Erhöhung der Temperatur- und Druckbedingungen im Kocher (LLF18 – LLF19) ebenso wie die Variante LLF20 mit den schwächsten Aufschlussbedingungen zeigen eine multimodale Verteilung der Faserlängen mit zunehmend größeren Faserlängen.

Ein Auftrag der geodätischen Länge als Punktdiagramm über den Mittelwerten der Klassen zeigt nochmal die Differenzierung zwischen den Varianten des Industrieversuchs (Abbildung 110).

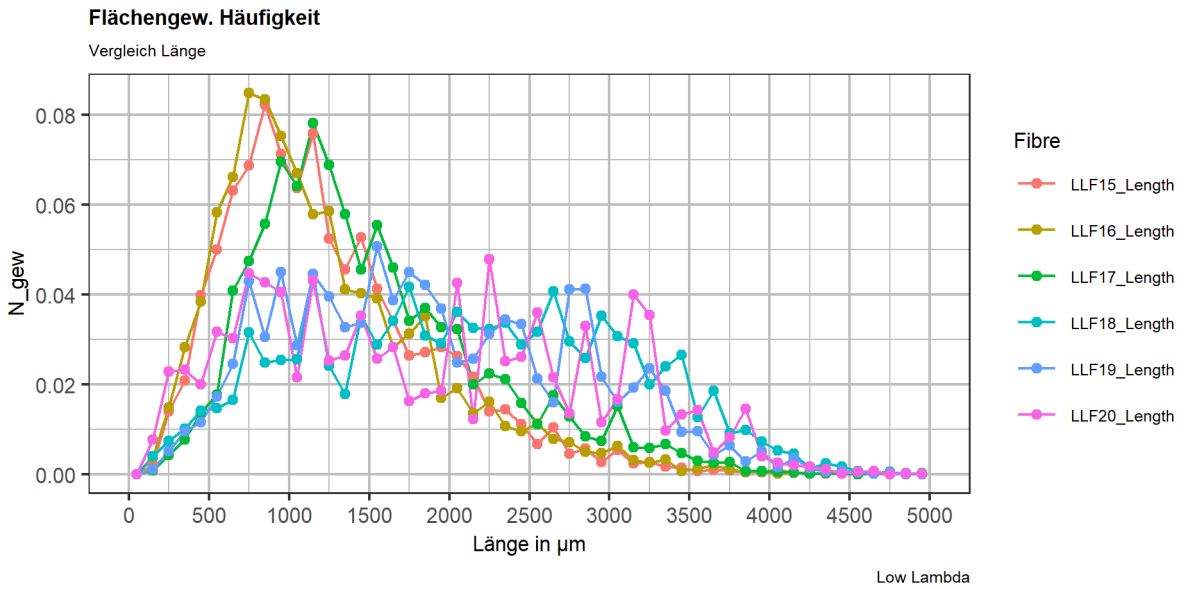


Abbildung 110 Flächengewichtete Länge von Faserproben entsprechend Tabelle 33 (Auswertung B)

Um im Weiteren den Einfluss der Fasergrößen auf die Wärmeleitfähigkeit noch differenzierter zu untersuchen, wurden Fasern des Typs LLF17, die im Kollektiv der Grundgesamtheit die niedrigste Wärmeleitfähigkeit aufweisen, auf einem Technikumssieb abgesiebt. Dabei wurden drei Fraktionen, im Weiteren als Grob, Mittel und Fein bezeichnet, hergestellt (Tabelle 34, Abbildung 111, Abbildung 113).

Vor dem Sieben wurden die Faserballen mit einer Einblasmaschine pneumatisch aufgeschlossen. Die in einem Big-Bag gelagerten Fasern wurden anschließend auf das Langsieb aufgegeben.

Die Trennung der Faserfraktionen ist dabei nicht mit der Schärfe einer Siebanalyse zu vergleichen. Insbesondere die Grobfraktionen enthalten auch eine nicht unerhebliche Menge an Feinanteil, der in Agglomeraten gebunden ist und während der begrenzten Siebzeit im Durchlauf nicht getrennt wird.

Tabelle 34 enthält die Massenanteile der hergestellten Fraktionen. Fein und Grobanteil stellen jeweils rund ein Drittel der gesiebten Masse dar.

Tabelle 34 Ergebnisse der Siebung von Fasern des Typs LLF17

	Maschenweiten			Massen	Massen
LLF17	in µm		in µm	in g	in %
Fein	0	< x <	500	6860.7	27.1%
Mittel	500	< x <	2000	10982.6	43.4%
Grob	2000	< x <	∞	7448.3	29.5%
Summe				25291.6	100.00%

Die Fraktionen unterscheiden sich auch optisch deutlich voneinander. Abbildung 111 zeigt die Fraktionen von Grob nach Fein.

Abbildung 111 Abgesiebte Faserstofffraktionen der Variant LLF17 – von links nach rechts: Grob, Mittel, Fein

Eine Darstellung der optischen Fasergrößenvermessung zeigt Abbildung 112. Die Fraktionen unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Längenverteilungen deutlich. Die Feinfraktion hat ein klar definiertes Maximum bei ca. 1200 µm und ist eher monomodal. Die Mittel- und Grobfraktion verschiebt sich hinsichtlich des Verteilungsmaximums deutlich in Richtung gröberer Fasern und zeigt insbesondere beider Mittelfraktion mehrere lokale Maxima der Häufigkeit.

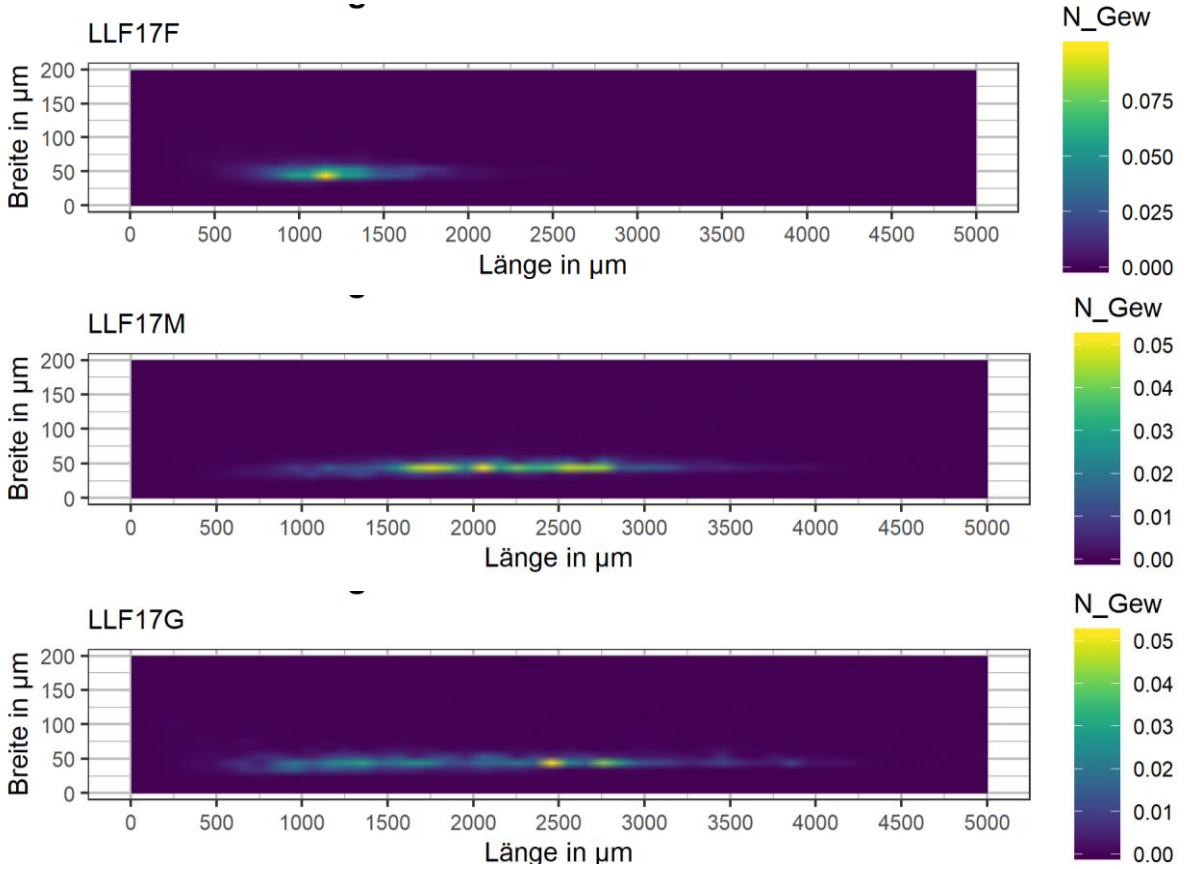


Abbildung 112 Fraktionen des Faserstoff LLF17 gemäß Tabelle 34 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B)

Aus den Fraktionen Grob, Mittel und Fein sowie Mischungen Grob/Mittel und Mittel/Fein wurden Laborflex Matten mit einer Dichte von 50 kg/m^3 hergestellt. Exemplarische Aufnahmen von den hergestellten Fasermatten finden sich in Abbildung 113.

Abbildung 113 Dämmstoffmuster Labor-Flex aus unterschiedlichen Faserproben gemäß Tabelle 33 (links und Mitte) und Fraktionen der Variante LLF17 (rechts

Die erzielte Wärmeleitfähigkeit ist in Abbildung 114 dargestellt, wobei die orange Linie mit 0,0358 W/(m K) den Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der vier hergestellten Matten aus der Variante LLF17 (also der nicht abgesiebten Grundgesamtheit der Faservariante) kennzeichnet.

Es zeigt sich, dass gegenüber der Grundgesamtheit der Fasern die Varianten Mittel und Fein eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Mischungen aus Mittel/Fein (im Verhältnis 50:50) sowie Grob/Mittel erreichen die gleiche Wärmeleitfähigkeit wie die Grundgesamtheit. Lediglich die Grobfraktion führt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit.

Die Ergebnisse könnten in der Richtung interpretiert werden, dass insbesondere die gröberen Fraktionen die Wärmeleitfähigkeit negativ beeinflussen. Jede Verschiebung in Richtung feiner aufgeschlossener Fasern würde also die Wärmeleitfähigkeit verbessern, wobei breitere Verteilungen (M/F) vs. engere Verteilungen (M oder F) ebenfalls ungünstiger sind. Dies deckt sich mit den Auswertungen der kontinuierlichen Beprobung ausgewählter Produktionslinien (IV.1.2).

Um den Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen wurde eine Fasermatte mit ausgeprägt schneller Verdichtung des Faserkuchens einer Variante mit ausgeprägt langsamer Verdichtung des Faserkuchens gegenübergestellt. Bei der Variante mit der langsamen Verdichtung wurde der Faserkuchen über den Zeitraum von xx h verdichtet.

Im Ergebnis zeigt sich eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit bei der Variante mit der langsamen Verdichtung (Abbildung 115). Eine Erklärung könnte in dem bei langsamer Verdichtung vermutlich weniger stark ausgeprägtem Rohdichteprofil liegen. Die Ermittlung von Rohdichteprofilen durch Slicen der Muster führte aufgrund der geringen Dicke von 40 mm nicht zu aussagekräftigen Ergebnissen. Das Slicen von Schichten ist bis zu einer Dicke von ca. 15 mm möglich ohne die Struktur der Proben zu verändern. Die Auflösung ist bei diesen Schichtstärken zu gering um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

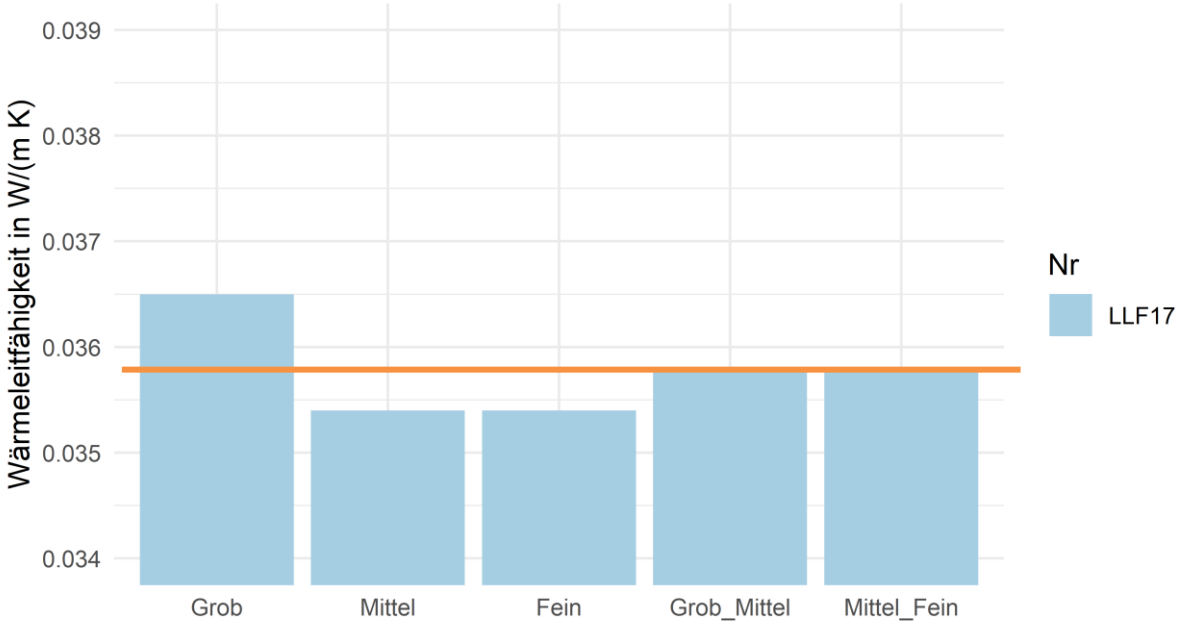


Abbildung 114 Orange Linie: Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von Labormustern mit 50 kg/m^3 aus den Faserproben LLF17 (0.0358 W/(m K); Balken: Labormustern aus Fraktionen der Faserproben LLF17 (Tabelle 34)

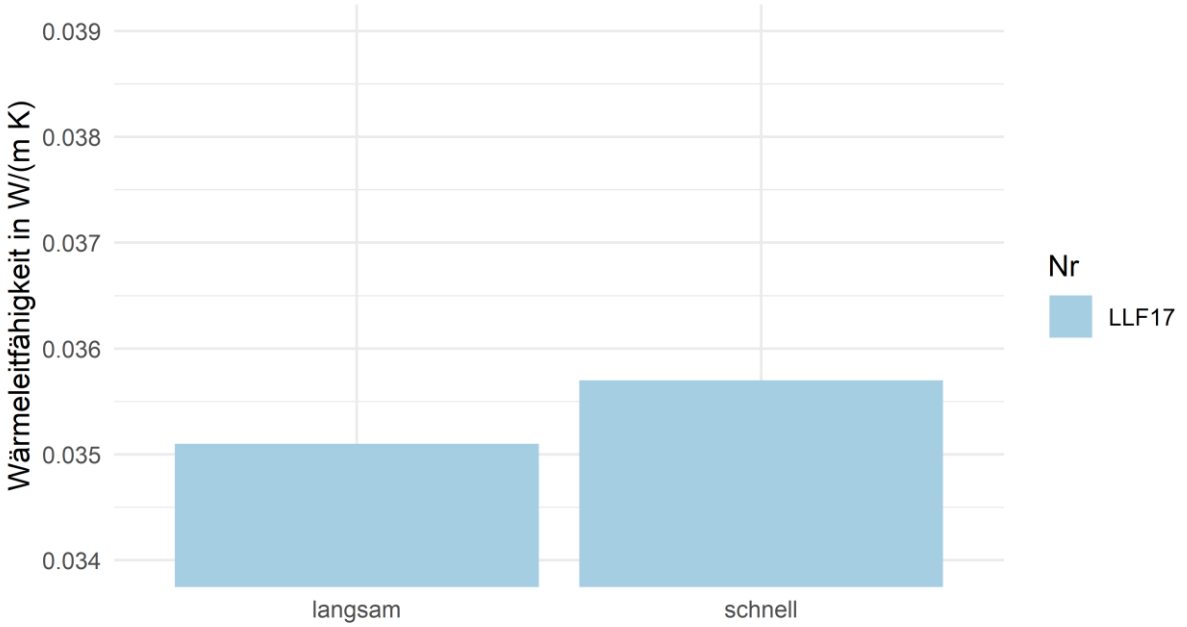


Abbildung 115 Wärmeleitfähigkeit von Labormustern der Variante LLF17 mit langsamer und schneller Verdichtung des Faserkuchens

VIII.3 Industrieversuch II

Für die im Folgenden vorgestellten Industrieversuche werden jeweils die Aufschlussbedingungen und die Ergebnisse der Fasergrößenanalyse sowie die Ergebnisse der effektiven Materialeigenschaften in tabellarischer Form vorgestellt und ausgewählte Aspekte diskutiert.

Die Ergebnisse werden anschließend in Kapitel VIII.6 zusammengefasst diskutiert.

Die Aufschlussbedingungen im Industrieversuch II sind in Tabelle 35 enthalten. Der Severity-Factor ist mit 89 – 394 in einem ähnlichen Bereich wie im Industrieversuch I. Es konnte außerdem die spezifische Stromaufnahme des Defibrators bestimmt werden. Der Anzeigewert der Stromaufnahme war jedoch am unteren Ende der Messskala. Insofern ist unklar, ob die Werte nicht teilweise überschätzt werden.

Tabelle 35 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs II (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr	I_defi_spez
-	in °C	in bar	in min	in min	in ton/h	in A/ton
LLF21	149	4.6	3.2	89	2.5	8
LLF22	158	6.1	3.2	163	2.5	8
LLF23	171	9.1	3.2	394	2.5	8

Die gemessenen Fasergrößen sind in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36 Fasergrößen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	QUANT_20	QUANT_50	QUANT_80	Q_dist_80_20	L_50	D_50	L_D
-	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	-
LLF21	427	1327	3323	2895	5769	617	9.3
LLF22	655	1950	4983	4328	3354	444	7.6
LLF23	561	1659	3868	3308	2888	266	10.9

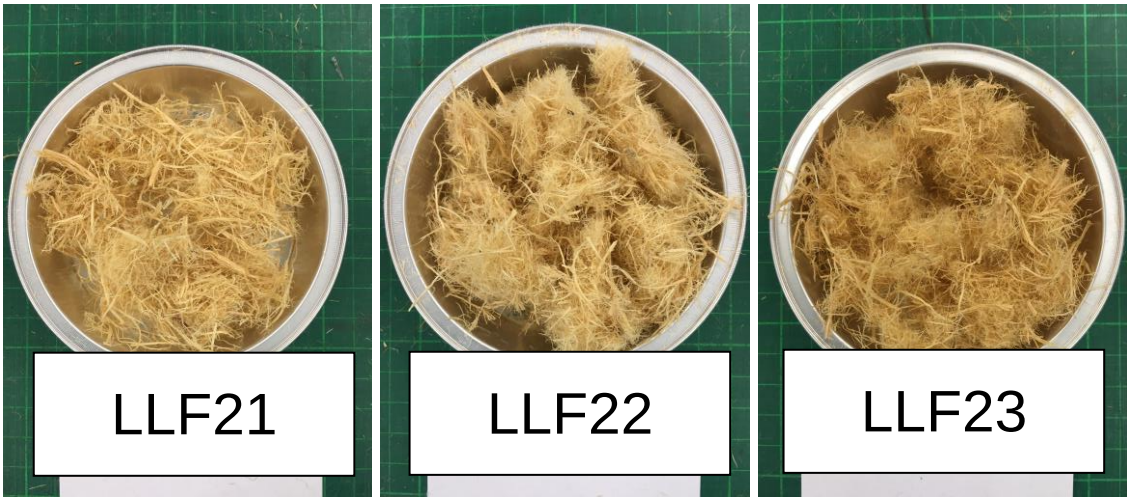


Abbildung 116 Fasermuster der Varianten LLF21 – LLF 23 aus dem Industrieversuch II

Die Faserkollektive unterschieden sich optisch deutlich voneinander (Abbildung 116). Die Variante LLF21 mit dem geringsten Plastifizierungsgrad der Hackschnitzel weist mehr Feinanteil und insgesamt gröbere Fasern auf als die Varianten LLF22 und LLF23 (Abbildung 117). Die Verteilung der Faserlängen ist bei der Variante LLF23 mit einem relativ klaren Maximum bei ca. 2500 µm am

definiertesten. Die Fasern weisen außerdem die kleinsten Faserdurchmesser und das größte L/D Verhältnis auf (Tabelle 36).

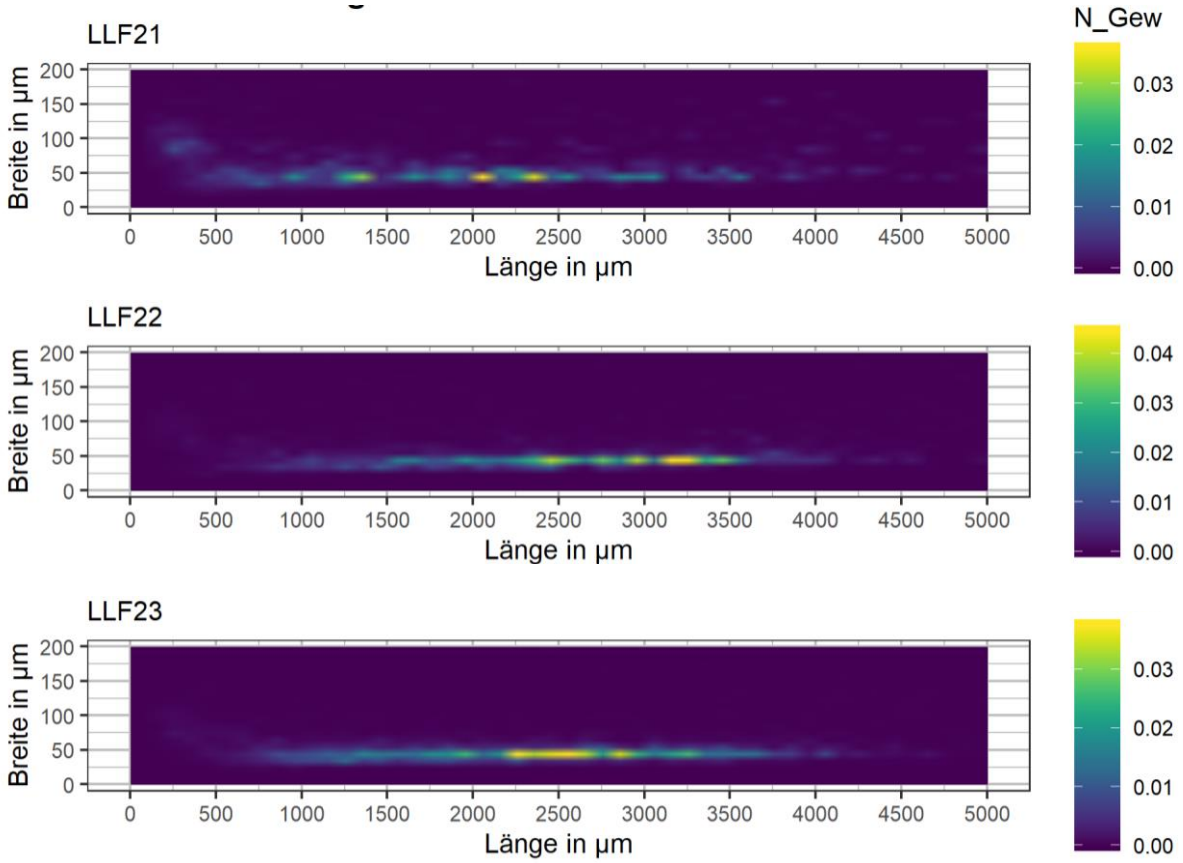


Abbildung 117 Faserstoffe aus Tabelle 35- Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap (Auswertung B)

Die niedrigste Wärmeleitfähigkeit erreichen die Matten aus der Faservariante LLF23 (Tabelle 37). Bei allen Varianten werden bei der jeweils höheren Dichte niedrigere Wärmeleitfähigkeiten erreicht.

Tabelle 37 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 35

Nr	Board	Speed	rho_tc	tc	r	Δrho
-	-	in m/min	in kg/m³	in W/(m K)	in (Pa s)/m	in kg/m³
LLF21	LLF21-1	5.8	54.1	0.0383	349.2	9.70
LLF21	LLF21-2	5.8	64.1	0.0380	441.2	13.1
LLF22	LLF22-1	5.8	55.3	0.0374	516.2	9.38
LLF22	LLF22-2	5.8	64.9	0.0368	804	12.1
LLF23	LLF23-1	5.8	53.2	0.0369	523.6	6.90
LLF23	LLF23-2	5.8	63.5	0.0365	764.2	11.1

An den Matten wurde neben der Wärmeleitfähigkeit auch der Strömungswiderstand bestimmt. Die Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem Strömungswiderstand zeigt Abbildung 118. Dabei staffeln sich die Strömungswiderstände wie auch die Wärmeleitfähigkeit jeweils entsprechend

der Rohdichte. Eine Erhöhung der Rohdichte führt zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit und einer Erhöhung des Strömungswiderstands.

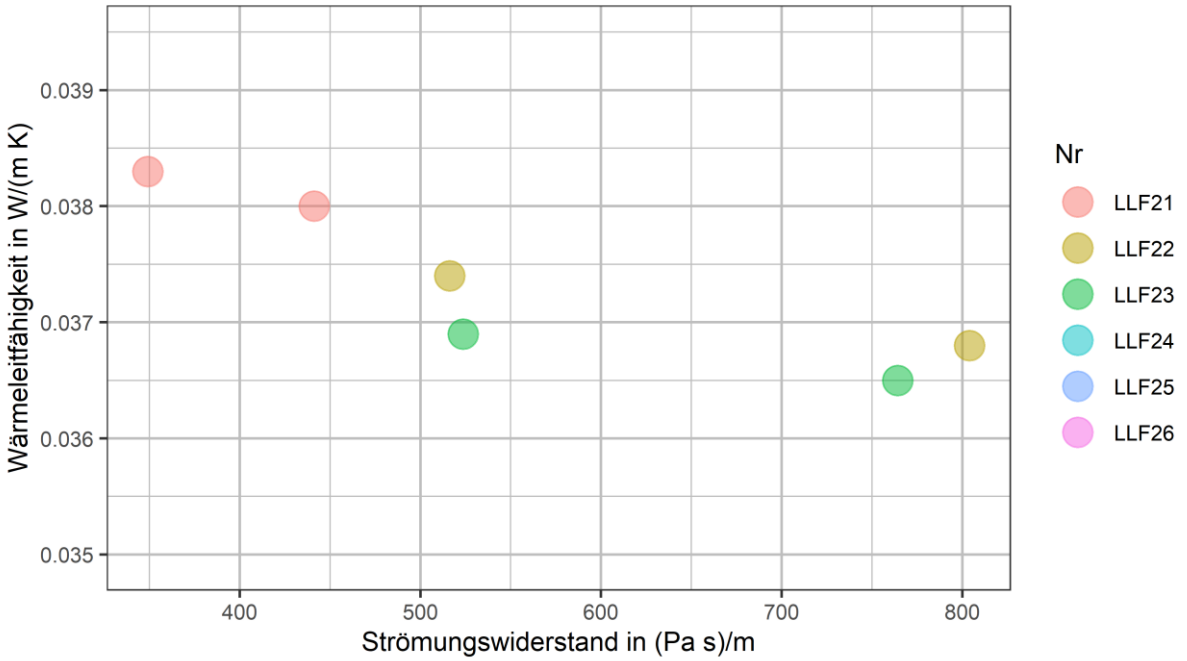


Abbildung 118 Wärmeleitfähigkeit und Strömungswiderstand der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 35

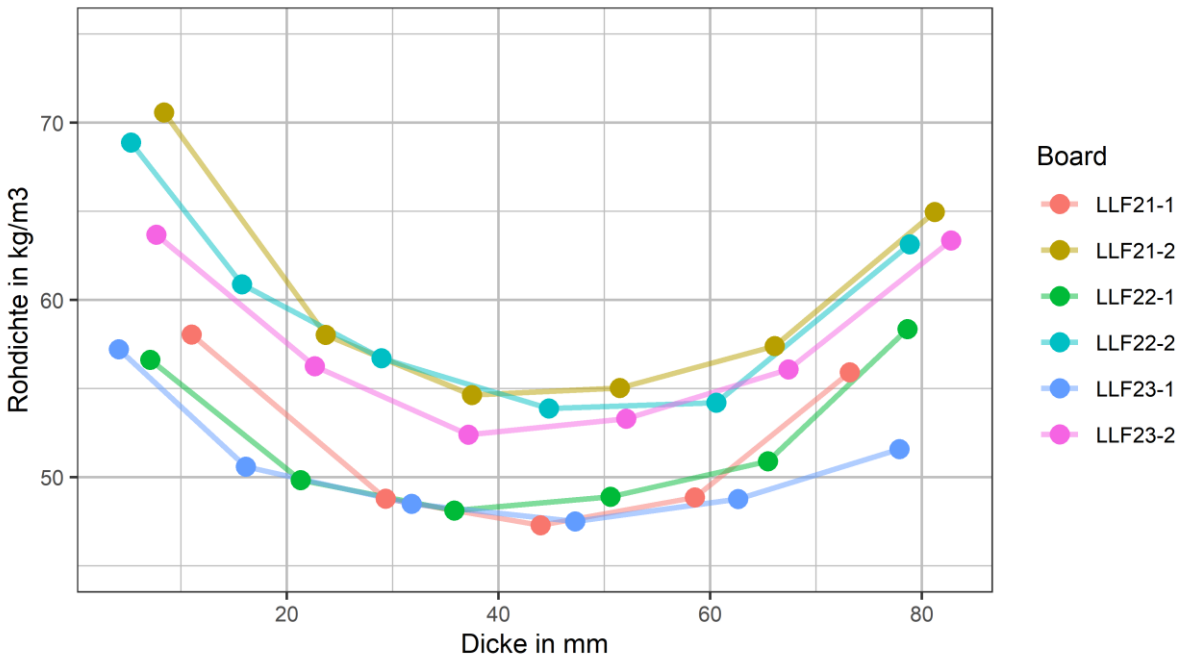


Abbildung 119 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 35

Die ermittelten Rohdichteprofile zeigt Abbildung 119. Interessant ist dabei eine Auswertung der Überhöhung des Rohdichteprofils Δrho (Tabelle 37). Dieser Parameter stellt die Differenz des Mittelwerts der Rohdichte in den beiden äußeren Schichten und der Schicht mit der geringsten Rohdichte (i. d. R. die Mittelschicht) dar.

Es zeigt sich, dass die jeweils höhere Dichtestufe auch ein stärker ausgeprägtes Dichteprofil aufweist. Dies ist plausibel, weil durch die konstante Produktionsgeschwindigkeit bei der Herstellung aller Varianten die Verdichtungsgeschwindigkeit von der Höhe der gestreuten Fasermatte abhängt. Je mehr Masse auf dem Band abgestreut wird, umso höher ist der Faserkuchen vor der Verdichtung und umso größer die Verdichtungsgeschwindigkeit.

Bei der Auswertung der Laborflex Matten (Abbildung 115) war ein positiver Einfluss einer langsamen Verdichtung zu erkennen. Um die Übertragbarkeit auf den Industriemaßstab zu überprüfen wurde im Industrieversuch III versucht, durch eine gezielte Variation der Bandgeschwindigkeit das Rohdichteprofil zu beeinflussen.

VIII.4 Industrieversuch III

Die Aufschlussbedingungen im Industrieversuch III sind in Tabelle 35 enthalten. Der Severity-Factor war mit SF = 262 nicht von den Bedingungen im Industrieversuch II differenziert. Die Gründe lagen in einer technischen Beschränkung bei der Bereitstellung des Dampfdrucks. Die spezifische Stromaufnahme des Defibrators lag mit ca. 10 – 11 A/ton etwas über den Werten beim Industrieversuch II. Die Messwerte lagen diesmal im Messbereich. Unklar ist, warum sich die spezifische Stromaufnahme im Defibrator nicht entsprechend dem engen und weiten Mahlspalt stärker differenziert.

Tabelle 38 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr	I_defi_spez	Mahlspalt
-	in °C	in bar	in min	in min	in ton/h	in A/ton	-
LLF24	165	6.3	3.2	262	3.1	10.3	Weit
LLF25	165	6.4	3.2	262	3.1	10.6	Eng

Die gemessenen Fasergrößen sind in Tabelle 39 dargestellt.

Tabelle 39 Fasergrößen im Industrieversuchs III (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	QUANT_20	QUANT_50	QUANT_80	Q_dist_80_20	L_50	D_50	L_D
-	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	-
LLF24	1192	3957	8060	6868	3188	287	11.1
LLF25	741	1922	5103	4363	2598	263	9.9

Die Fasern unterscheiden sich optisch deutlich voneinander (Abbildung 120). Die Auswertung der Verteilung von Faserlänge und -breite in Abbildung 121 zeigt bei der Variante LLF25 einen größeren Anteil feinerer Fasern, ist aber nicht so deutlich differenziert wie es der optische Eindruck vermuten lässt.

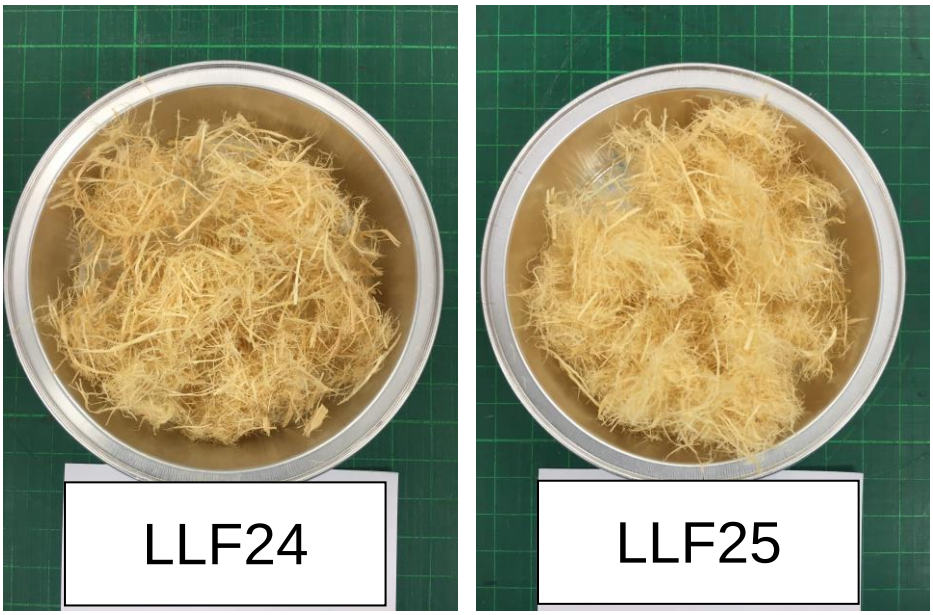


Abbildung 120 Fasermuster der Varianten LLF24 und LLF25 aus dem Industrieversuch III

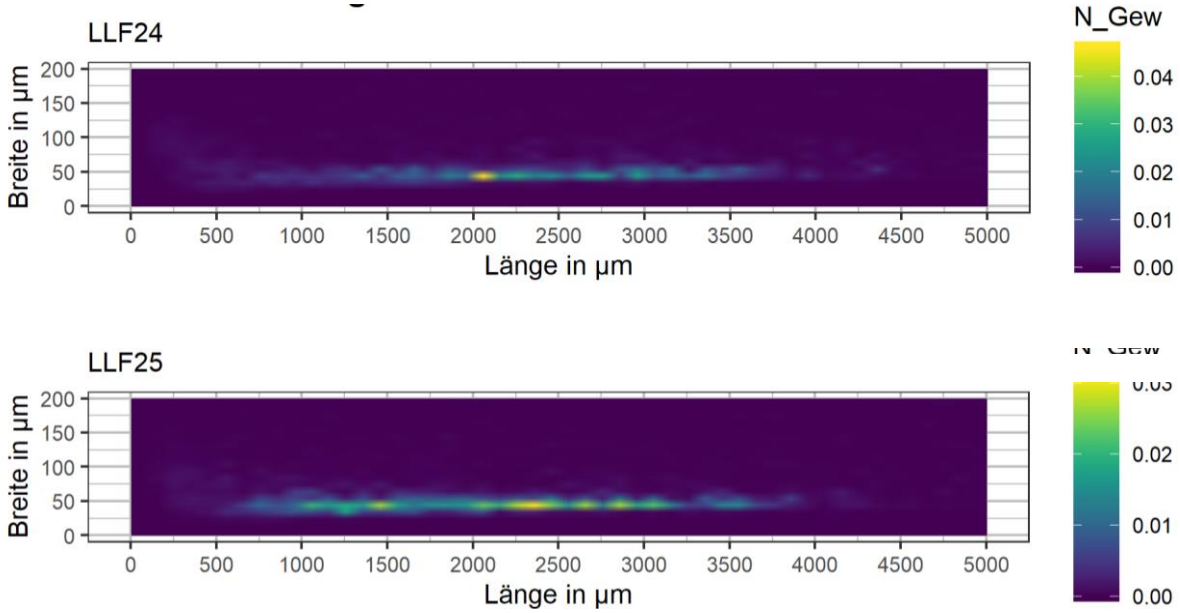


Abbildung 121 Faserstoffe aus Tabelle 38 Tabelle 35- Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap

Die Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich deutlich zwischen den beiden Faservarianten (Tabelle 40). Die Matten aus der Faser LLF24 mit dem weiten Mahlspalt und niedriger Rohdichte zeigen eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als die Matten aus der Faser LLF25 mit dem engen Mahlspalt und höherer Rohdichte. Leider kann nicht differenziert werden ob der Einfluss der Rohdichte oder der Einfluss des Mahlspalt und damit der erzielten Fasergrößen für die Ergebnisse verantwortlich ist.

Interessant ist der Vergleich der Rohdichteprofile und der Überhöhung des Rohdichteprofils innerhalb der Faservarianten LLF24 und LLF25 bei einer Variation der Bandgeschwindigkeit von 4 auf 7 m/min. Bei der Variante LLF24 zeigt sich kein Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf die Ausprägung des Rohdichteprofils. Bei der Variante LLF25 führt die geringere Bandlaufgeschwindigkeit zu einem ausgeprägteren Rohdichteprofil, was der Theorie zur Verdichtungsgeschwindigkeit widerspricht. Zu

erkennen ist jedoch wieder der Einfluss der mittleren Rohdichte. So weisen die Matten aus der Faservariante LLF24 mit der geringeren Rohdichte auch das insgesamt geringere Dichteprofil auf.

Tabelle 40 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 37

Nr	Board	Speed	rho_tc	tc	Δrho
-	-	in m/min	in kg/m³	in W/(m K)	in kg/m³
LLF24	LLF24-1	7	54.024	0.0387	7.1
LLF24	LLF24-2	4	53.552	0.0395	7.5
LLF25	LLF25-1	7	64.612	0.0358	9.8
LLF25	LLF25-2	4	65.12	0.0358	12.0

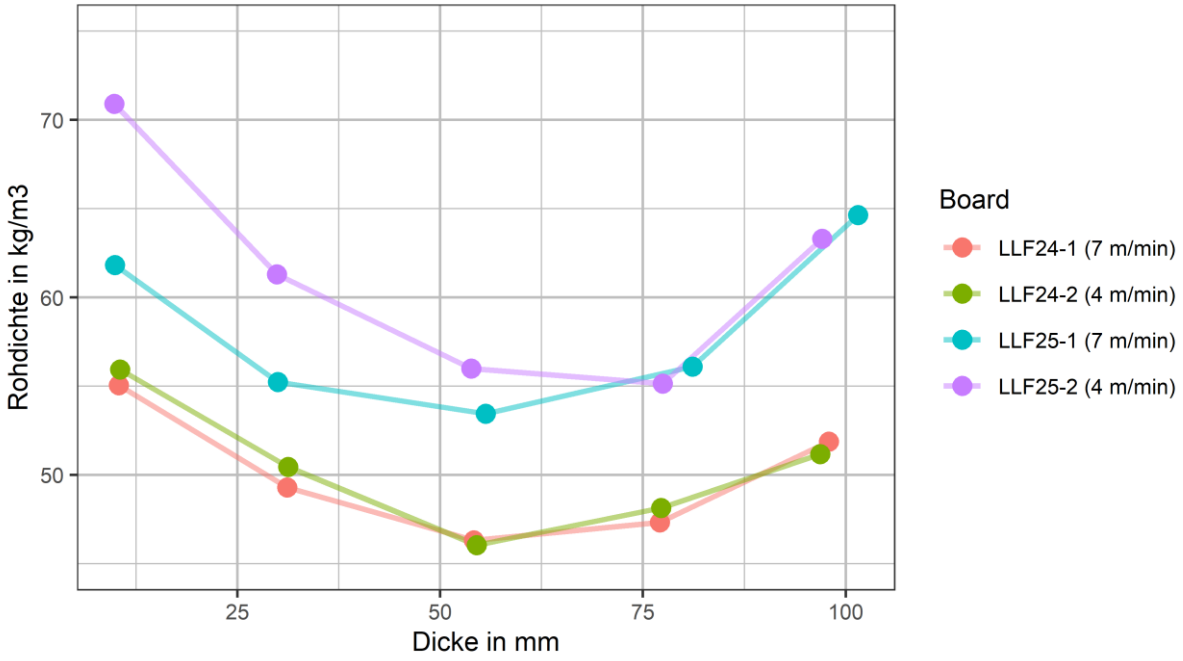


Abbildung 122 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 38

VIII.5 Industrieversuch IV

Die Aufschlussbedingungen im Industrieversuch IV sind in Tabelle 41 enthalten. Durch eine extrem lange Kochzeit von über 15 min konnte ein Severity-Factor von SF = 611 erreicht werden, der gegenüber den Varianten aus Industrieversuch II und III deutlich differenziert ist. Im Weiteren konnte eine sehr hohe Energie beim Aufschluss erzielt werden. Die spezifische Stromaufnahme des Defibrators liegt mit ca. 21 A/ton fast doppelt so hoch wie bei Industrieversuch II.

Tabelle 41 Aufschlussbedingungen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten) mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	T_cook	p_cook	Z_cook	SF	m_fibr	l_defi_spez
-	in °C	in bar	in min	in min	in ton/h	in A/ton
LLF26	154	6.6	15.4	611	1.5	20.7

Die Fasergrößen des Industrieversuch IV zeigt Tabelle 42. Gegenüber den Varianten aus Industrieversuch II und III werden deutlich kleinere Fasergrößen erreicht. Dies ist sowohl bei den Quantilen der Siebanalyse als auch bei den Auswertungen der 2D-Scans ersichtlich.

Tabelle 42 Fasergrößen im Industrieversuchs IV (Herstellung flexibler Matten mit unterschiedlichen Aufschlussparametern und zwei Zielrohdichten)

Nr.	QUANT_20	QUANT_50	QUANT_80	Q_dist_80_20	L_50	D_50	L_D
-	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	in µm	-
LLF26	479	929	1881	1402	1948	186	10.5

Abbildung 123 Fasermuster der Variante LLF26 aus dem Industrieversuch IV

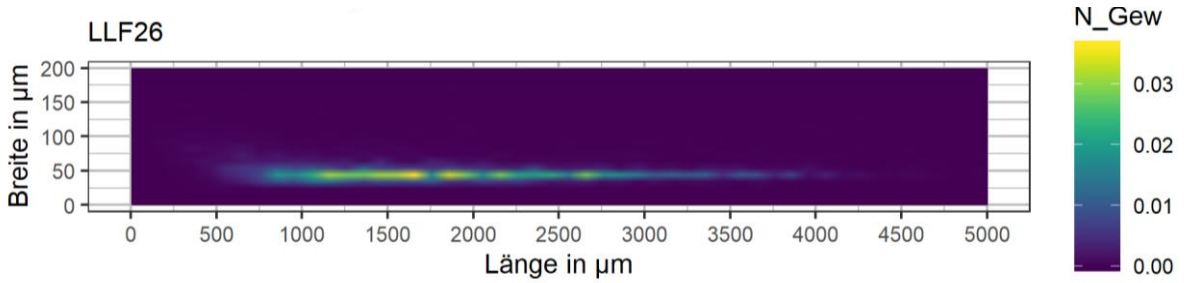


Abbildung 124 Faserstoff LLF26 aus Tabelle 41 - Flächengewichtete Häufigkeit der Längen vs. Breiten (2D-Scans) als heatmap

Die Wärmeleitfähigkeit und das Rohdichteprofil wurde an zwei Matten mit einer Dichte von jeweils ca. 55 kg/m³ untersucht. Bei der Herstellung wurde die Bandgeschwindigkeit gegenüber Industrieversuch III nochmal reduziert und lag bei 3 m/min. (Tabelle 43)

Tabelle 43 Physikalische Eigenschaften der industriell hergestellten Matten aus den Faserstoffen gemäß Tabelle 37

Nr	Board	Speed	rho_tc	tc	Δrho
-	-	in m/min	in kg/m³	in W/(m K)	in kg/m³
LLF24	LLF24-1	3	55.3	0.0349	4.09
LLF24	LLF24-2	3	54.7	0.0355	4.81

Die erzielte Wärmeleifähigkeit lag mit 0.0349 W/(m K) und 0.0355 W/(m K) auf dem insgesamt niedrigsten Niveau der durchgeführten Industrieversuche.

Durch die geringe Bandgeschwindigkeit konnte außerdem ein signifikant schwächer ausgeprägtes Rohdichteprofil erzielt werden. Die Rohdichtedifferenz zwischen den Decklagen und der Mittellage der untersuchten Matten lag bei ca. 4 – 5 kg/m³.

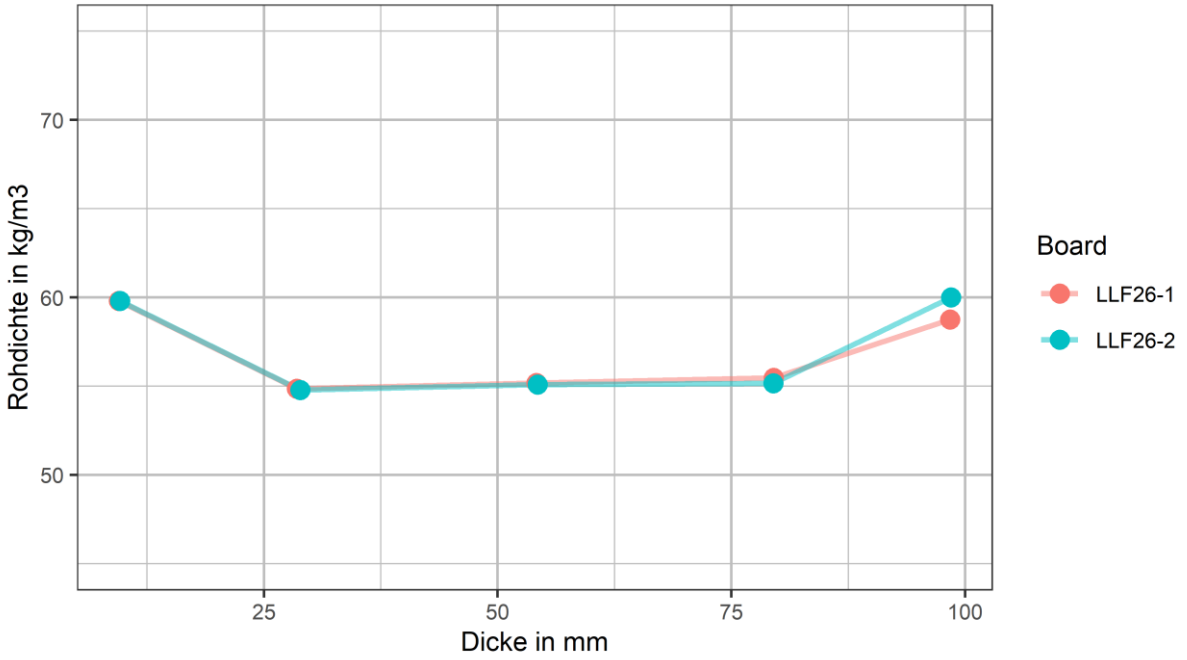


Abbildung 125 Rohdichteprofile der industriell hergestellten Matten aus dem Faserstoff gemäß Tabelle 41.

VIII.6 Zusammenfassende Auswertung zu den Industrieversuchen II – IV

Die in den Industrieversuchen II – IV ermittelten Daten werden im Folgenden zusammengefasst ausgewertet. Die Ergebnisse werden in der Form von Scatterplots analog den Auswertungen zu der kontinuierlichen Beprobung ausgewählter Produktionslinien aufbereitet.

Zunächst werden die Wärmeleitfähigkeit der Rohdichte, dem Severity-Factor und der spezifischen Stromaufnahme gegenübergestellt (Abbildung 126). Bei der Rohdichte zeigt sich eine Differenzierung entsprechend der intentionsgemäß gewählten Rohdichtegruppen von ca. 55 kg/m³ und ca. 65 kg/m³.

Der Severity-Factor korreliert gut mit der Wärmeleitfähigkeit. Eine Erhöhung des Severity-Factor entsprechend den Industrieversuchen führt zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit. Die funktionale Abhängigkeit ist nicht linear, sondern folgt einer Abklingfunktion. Die Ergebnisse werden klarer, wenn die Ergebnisse der Matten aus der Faservariante LLF24 ausgeblendet werden.

Ähnliche Verhältnisse lassen sich für die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der spezifischen Stromaufnahme erkennen. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die gemessene Stromaufnahme im Industrieversuch II an der untersten Grenze des Messbereichs war. Es ist also unklar ob die tatsächliche Stromaufnahme und damit auch die spezifische Stromaufnahme noch niedriger war, was den Zusammenhang noch stärker untermauern würde.

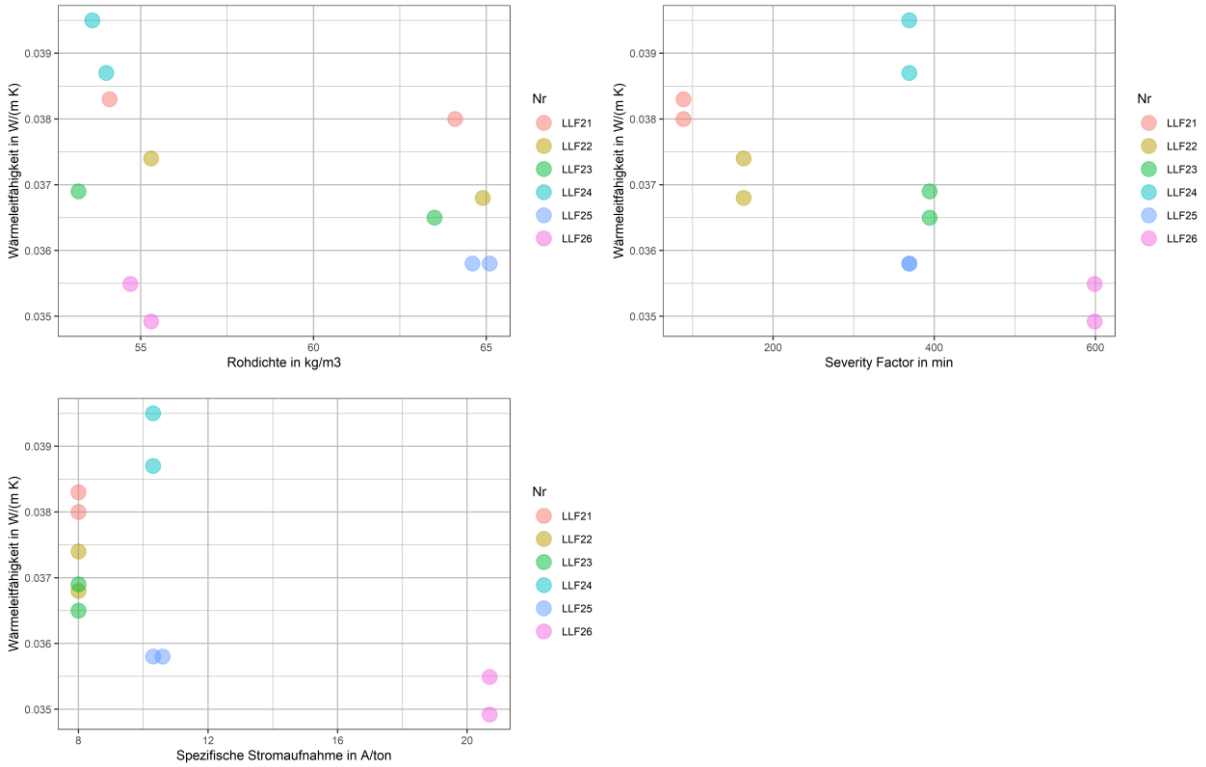


Abbildung 126 Wärmeleitfähigkeit als Funktion von Rohdichte, Severity-Factor und spezifischer Stromaufnahme im Defibrator (Datenbasis: Industrieversuche II – IV)

Der Einfluss der Dichteprofile und der Bandgeschwindigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit sowie den Zusammenhang zwischen Dichteprofil und Bandgeschwindigkeit zeigt Abbildung 127.

Ein Einfluss des Dichteprofils und damit der Bandgeschwindigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit lässt sich vermuten. Der Effekt wird aber leider bei den untersuchten Varianten aus Industrieversuch III, mit einer Differenzierung der Bandgeschwindigkeit zwischen 4 und 7 m/min nicht bestätigt. Trotzdem werden die insgesamt niedrigsten Werte der Wärmeleitfähigkeit mit dem am schwächsten ausgeprägten Rohdichteprofil erreicht. Da hier gleichzeitig der intensivste Aufschluss (Hackschnitzelplastifizierung und Mahlenergie) eingestellt wurde, ist unklar welcher Einfluss überwiegt.

Eindeutiger sind die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses von Faserlänge und -breite. In Abbildung 128 sind die Mediane von Faserlänge und -breite (Auswertung A nach IV.2.11) ausgewertet. Unter Ausschluss von Faservariante LLF24 zeigt sich ein sehr gut bestimmter Zusammenhang. Mit abnehmender Faserlänge und -breite sinkt auch die Wärmeleitfähigkeit. Interessant ist, dass über alle Varianten hinweg mit Ausnahme von LLF22 in etwa gleiche L/D Verhältnisse von L/D ca. 10 erreicht werden. Die Variante LLF22 weist mit L/D = 7.6 ein niedrigeres L/D Verhältnis auf.

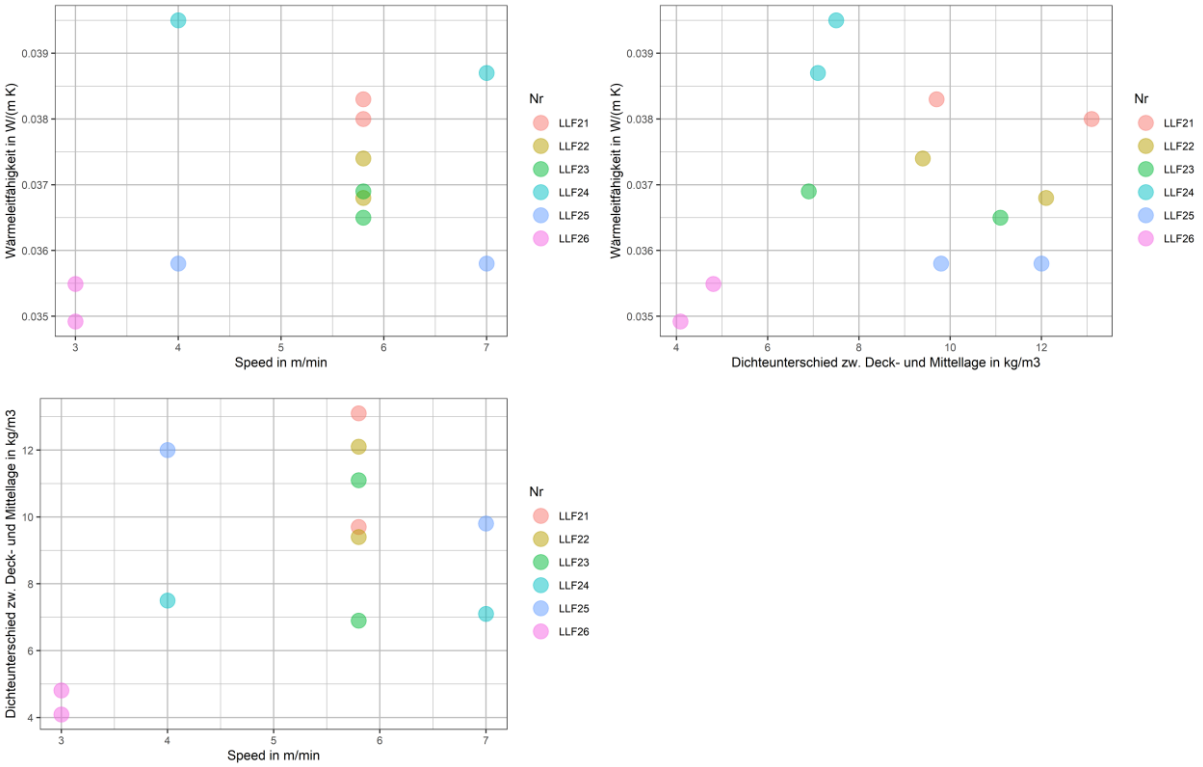


Abbildung 127 Wärmeleitfähigkeit als Funktion von Bandgeschwindigkeit und Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittellage sowie Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittellage als Funktion der Bandgeschwindigkeit (Datenbasis: Industrieversuche II – IV)

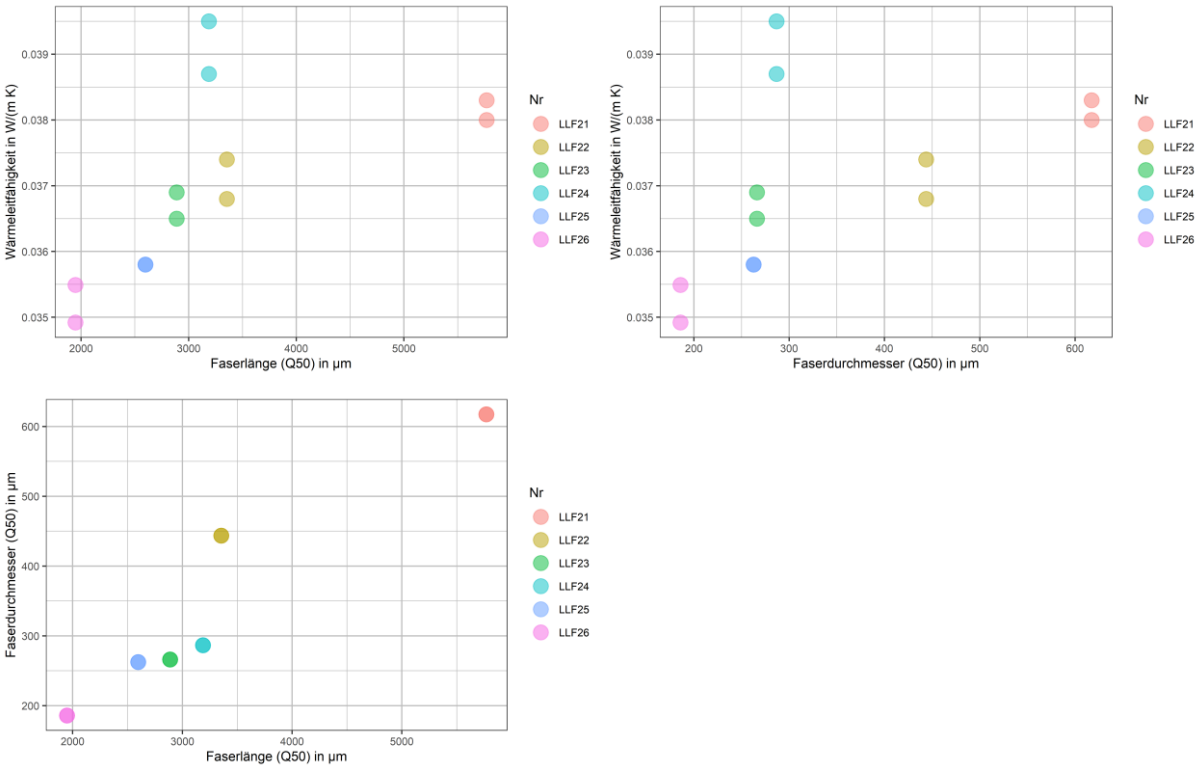


Abbildung 128 Wärmeleitfähigkeit als Funktion des Medians der Faserlänge und Faserdurchmessers (Auswertung A) sowie der Zusammenhang zwischen Faserdurchmesser und Faserlänge (Datenbasis: Industrieversuche II – IV)

Der Zusammenhang zwischen den Quantilen der Siebanalyse und der Wärmeleitfähigkeit war bei der Auswertung der kontinuierlichen Beprobung ausgewählter Produktionslinien für die flexiblen Matten sehr gut bestimmt (VIII.1.2). Bei der Auswertung der Industrieversuche zeigt sich ebenfalls ein Zusammenhang in Richtung niedriger Wärmeleitfähigkeit bei kleineren Fasergrößen in den Quantilen. Die Ergebnisse Bei der Betrachtung der Zusammenhänge in Abbildung 126 und Abbildung 128Abbildung 127 waren die Ergebnisse der Variante LLF24 von großen Residuen gegenüber einer gedanklichen Regression der gezeigten Zusammenhänge gekennzeichnet. Würde man die Variante LLF24 auch in Abbildung 129 vernachlässigen, würde sich kein Zusammenhang mehr zwischen den Quantilen der Siebanalyse und der Wärmeleitfähigkeit ergeben.

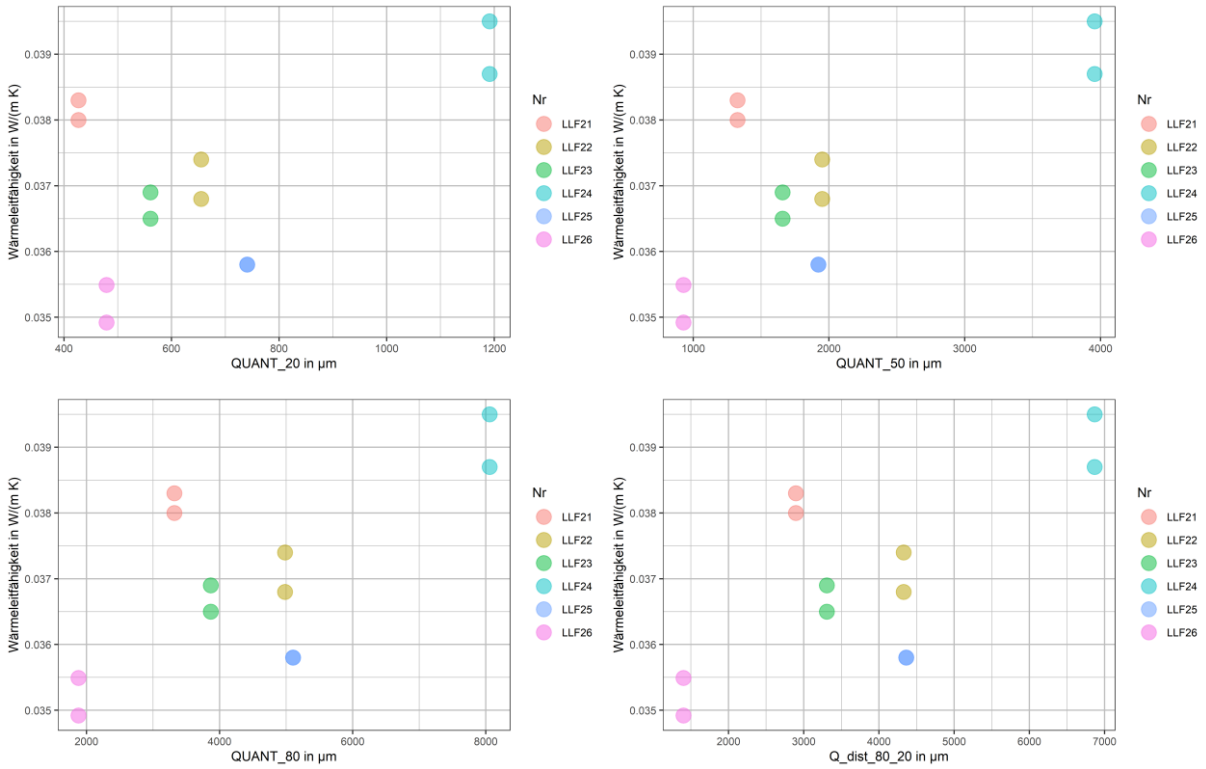


Abbildung 129 Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Quantile der Siebanalyse (20 %-, 50 %- und 80 % Quantil) sowie als Funktion der Distanz zwischen 80 %- und 20 %-Quantil (Datenbasis: Industrieversuche II – IV)

Wie diskutiert zeigen die Ergebnisse der Variante LLF24 bzgl. des Zusammenhangs zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem Severity-Factor sowie der spezifischen Stromaufnahme ein deutlich abweichendes Verhalten. Auch wenn sich kein Ausschluss der Daten auf Basis von Ausreißertests begründen lässt, wurde die Datenbasis einmal komplett und einmal unter Ausschluss der Variante LLF24 ausgewertet.

Abbildung 130 zeigt abschließend das Korrelationsdiagramm zu den Daten aus den Industrieversuchen II – IV unter Auswertung des kompletten Beobachtungsumfangs (N = 12). Im Gegensatz zu den Auswertungen der kontinuierlichen Beprobung für die vergleichbare Produktgruppe B5/B6 zeigt sich eine relativ gut bestimmte negative Korrelation zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Kochzeit. Der gleiche Korrelationskoeffizient ergibt sich für den Severity-Factor (nicht signifikant)

sowie die spezifische Stromaufnahme. Eine Erhöhung dieser drei Parameter führt also zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit.

Positive Korrelationen zur Wärmeleitfähigkeit zeigen sich zu den Fasergrößen L_50 (Median der Faserlänge im 2D-Scan nach Auswertung A), D_50 (Median der Faserdurchmesser im 2D-Scan nach Auswertung A) sowie den Quantilen der Siebanalyse. Die Fasergrößen L_50 und D_50 sind dabei sehr stark negativ mit dem Severity-Factor und der spezifischen Stromaufnahme korreliert. Eine Erhöhung dieser Paramter führt also zu allgemein kleineren Fasergrößen, die wiederum mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit korrelieren.

Die Differenz der Decklagen- und Mittelschichtdichten (delta_rho) und die Bandlaufgeschwindigkeit hängen positiv zusammen (nicht signifikant), korrelieren aber nicht signifikant mit der Wärmeleitfähigkeit.

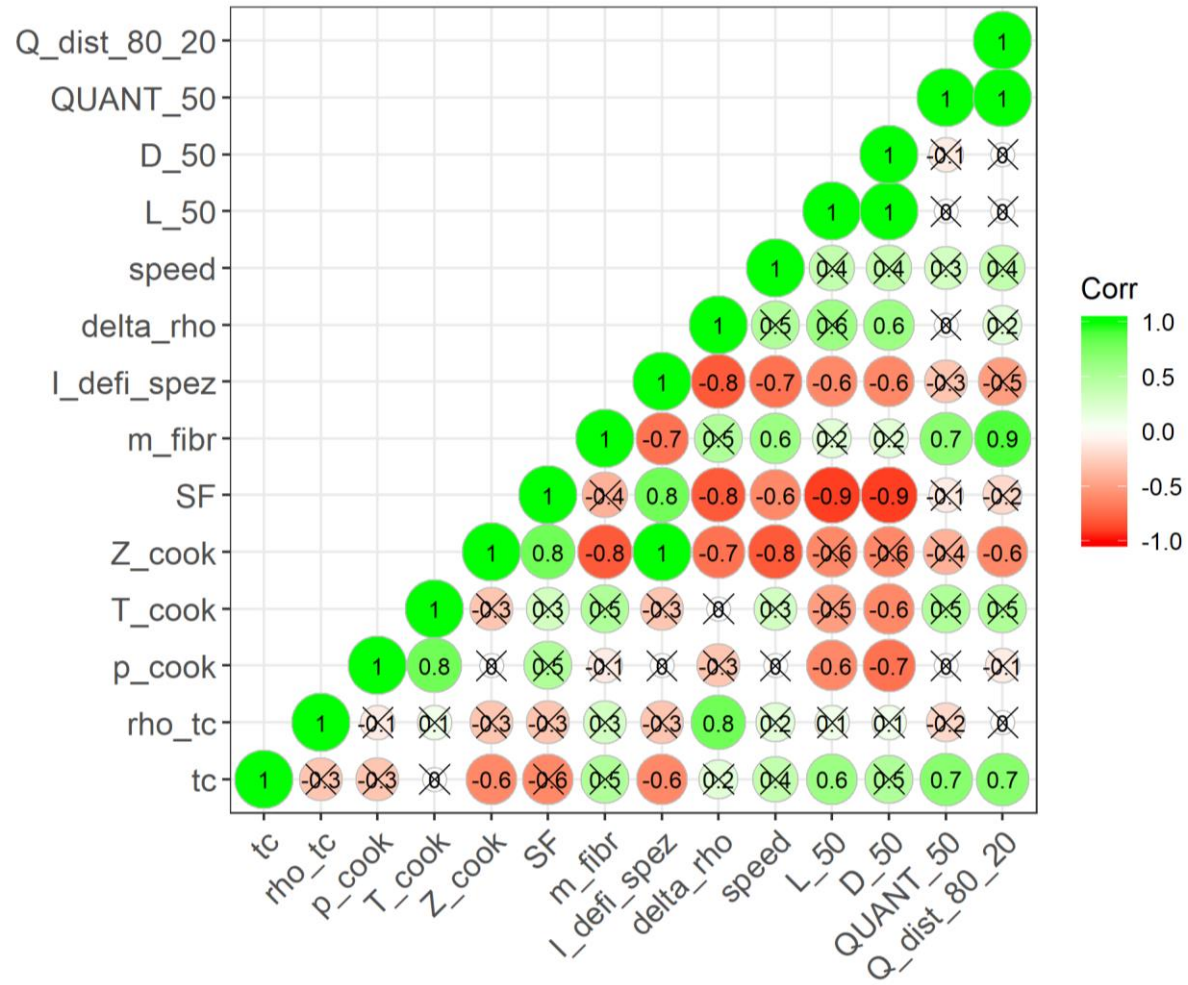


Abbildung 130 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Größen (Datenbasis: Industrieversuche II – IV)

Bei einer Auswertung der Datenbasis unter Ausschluss der Variante LLF24 (N = 10) bleiben die Zusammenhänge im Wesentlichen erhalten (Abbildung 131). Die Korrelationen zwischen Wärmeleitfähigkeit und Kochzeit, Severity-Factor und spezifischer Stromaufnahme sind nun aber deutlich stärker und durchgehend signifikant korreliert.

Ebenfalls deutlich stärker wird die positive Korrelation zu den Fasergrößen L_50 und D_50, während die Korrelationen zu den Quantilen der Siebanalyse nicht mehr signifikant sind.

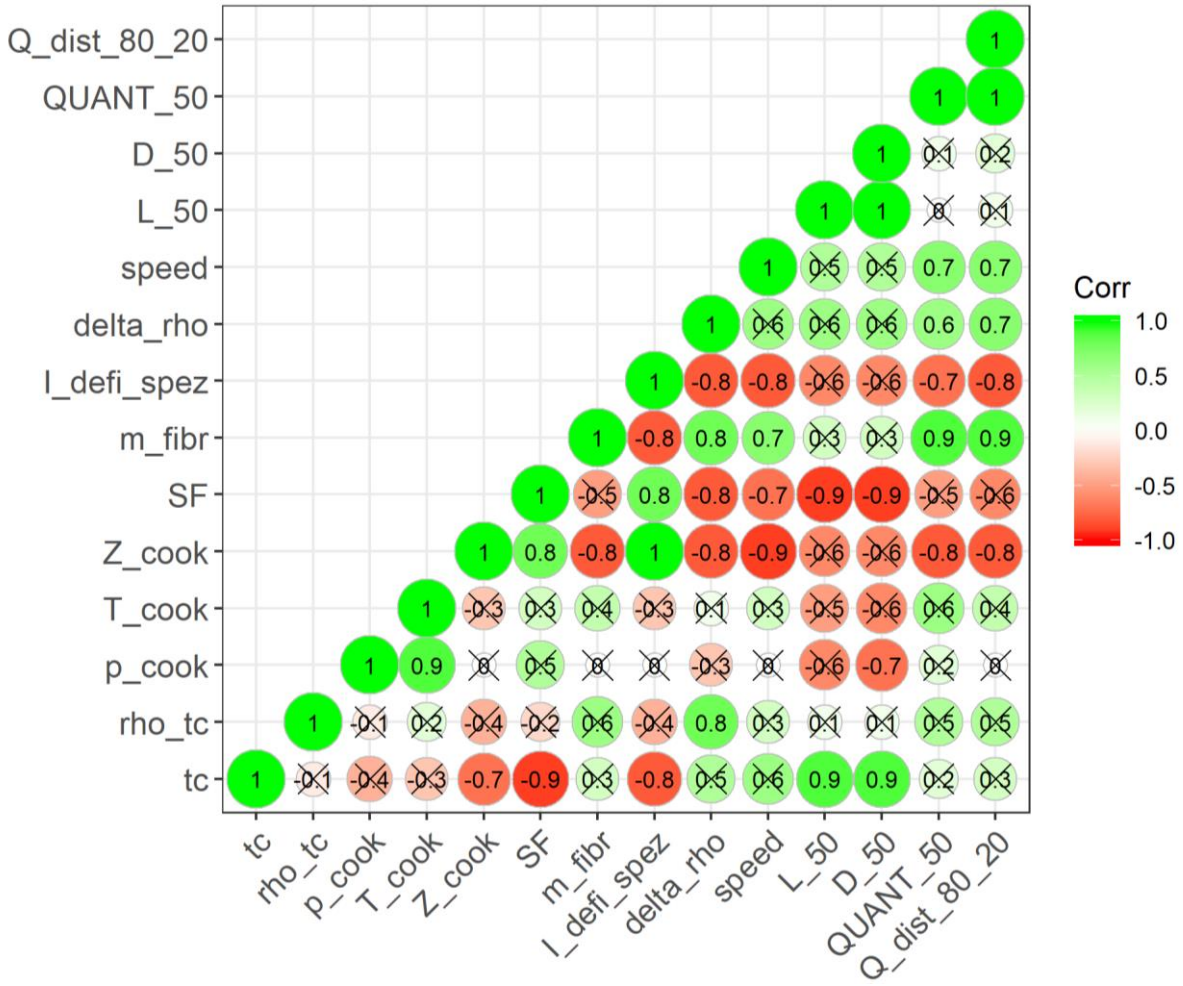


Abbildung 131 Korrelationsdiagramm zu ausgewählten Größen (Datenbasis: Industrieversuche II – IV unter Ausschluss der Variante LLF24)

IX. Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst und die wichtigsten Erkenntnisse hinsichtlich einer potentiellen Verwertung dargestellt.

IX.1 Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen der umfangreichen physikalischen Charakterisierung konnten Zusammenhänge zwischen der Wärmeleitfähigkeit und anderen produktions- und produktspezifischen Eigenschaften gewonnen werden. Die Charakterisierung einer umfangreichen Materialpalette, angefangen bei Universalplatten aus dem Nassverfahren mit höherer Dichte (B1, B2), Platten aus dem Trockenverfahren mit hoher und niedriger Dichte (B3, B4), flexiblen Matten (B5, B6) sowie Platten mit niedriger Dichte aus dem Nassverfahren (B7) deckt die typische Bandbreite einer modernen Holzfaserdämmstoffproduktion ab (Tabelle 3).

Das Material aus der initialen Beprobung wurde hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit (Abbildung 32), der Druckspannung (Abbildung 35), des Strömungswiderstands (Abbildung 33), der Rohdichteprofile (Abbildung 39), des Sorptionsfeuchtegehalts (Abbildung 50) sowie der Reindichte (Abbildung 40) untersucht. Neben den Platten, bzw. Matten wurden außerdem umfangreiche Untersuchungen zu Fasergrößen (Siebanalysen, 2D-Scanner) und Hackschnitzelgrößenverteilungen durchgeführt. Es zeigten sich die bekannten Korrelationen mit der Dichte, die aber im Bereich niedriger Rohdichte von anderen Effekten überlagert werden. Innerhalb vergleichbarer Strukturen (d.h. vergleichbarer Herstellverfahren) screent auch der Strömungswiderstand gut die Wärmeleitfähigkeit. Bei einem Vergleich zwischen unterschiedlichen Herstellverfahren sind jedoch andere Einflüsse dominanter – d.h. vergleichbare Strömungswiderstände repräsentieren dann unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten.

Die Unterschiede in der Reindichte der Fasern sind gering. Die Literaturwerte für die Reindichte der Zellwand werden teilweise unterschritten, was auch methodisch bedingt sein kann. Interessante Unterschiede ergeben sich zwischen der Reindichte der unbehandelten Fasern und der Reindichte der fertigen Platten/Matten. Während die gegenüber den Einzelfasern reduzierte mittlere Reindichte bei den flexiblen Matten durch die Zugabe der Bindefasern größenordnungsmäßig erklärbar ist, wird die Reindichte der PMDI gebundenen Platten vermutlich durch das Coating der Faserbündel verursacht. Das Messgas kann dann nicht mehr in die intrapartikulären Hohlräume eindringen. Auf Basis der Reindichte wurde die Porosität der Platten/Matten ermittelt. Es zeigt sich ein gut bestimmter Abfall der Wärmeleitfähigkeit mit ansteigender Porosität. Aufgrund der geringen Unterschiede in der Reindichte der Fasern ist die Porosität jedoch in erster Linie von der Rohdichte bestimmt. Ein Einfluss der Reindichte der Fasern auf die Wärmeleitfähigkeit kann daraus nicht abgeleitet werden.

Die Auswertung der Hackschnitzelgrößenverteilung zeigt Unterschiede zwischen den Produktionsverfahren. Aufgrund des Problems der Repräsentativität der Beprobung wurde auf eine weitere Beprobung verzichtet.

Interessante Aspekte ergeben sich aus der Auswertung der Fasergrößen. Mit dem 2D-Scanner wurden Faserlängen und -breiten ermittelt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den

Varianten. Die kürzesten Fasern werden mit dem Nassverfahren erzielt, wobei die Fasern für die Variante B7 mit niedriger Wärmeleitfähigkeit längere Fasern enthalten als die Fasern für die Universalplatten B1/B2. Insgesamt längere Fasern werden für die Platten im Trockenverfahren erzeugt. Die längsten Fasern kommen für die flexiblen Matten zum Einsatz. Die Unterschiede in den Faserdicken sind weniger deutlich ausgeprägt.

Insgesamt lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Fasergrößenverteilungen und der Wärmeleitfähigkeit abschätzen. Bei einem Vergleich der Varianten B5 und B6 die sich in der Wärmeleitfähigkeit deutlich unterscheiden, fällt auf, dass die mittlere Faserlänge zwar gleich ist (Abbildung 45), die Verteilung der Faserlänge bei B6 (niedrige Wärmeleitfähigkeit) aber deutlich schlanker ausfällt als bei der Variante B5 (höhere Wärmeleitfähigkeit) (Abbildung 43). Bei der Variante B6 liegt außerdem eine homogenere Faserdickenverteilung vor (Abbildung 44). Die anderen Varianten weisen eine zumeist deutlich rechtsschiefe Faserdickenverteilung auf.

Deutlich ist auch der Einfluss der Zugabe des reject Anteils (Rückführung von Produktionsresten). Bei allen Varianten F2 → F3 (Trockenverfahren), F4 → F5 und F6 → F7 (flexible Matten) zeigt sich, dass durch die Zugabe des reject, Kollektive mit mehr Feinanteil und einer insgesamt undefinierteren Verteilung (multimodale Verteilungen) entstehen (Abbildung 47).

Auch bei den Siebanalysen zeigen sich entsprechende Einflüsse. Die Fasern von Platten mit niedriger Wärmeleitfähigkeit zeigen eine steilere Verteilung mit weniger groben Fasern (Abbildung 48).

Zur Bestimmung der Anteile der Wärmeübertragungsmechanismen wurde bei zwei Varianten ein aufwändiger messtechnischer Versuch unternommen. Durch die Notwendigkeit zur Evakuierung der Plattenmaterialien in einer flexiblen Folienumhüllung war das Verfahren nur für Produkte mit höherer Rohdichte umsetzbar. Den größten Anteil an der Wärmeübertragung hat mit ca. 80 % die Gaswärmeleitfähigkeit der Luft. Wärmestrahlung hat einen Einfluss von ca. 13 – 14 %. Die Wärmeleitung im Feststoffgerüst trägt mit ca. 5 – 7 % zur äquivalenten Wärmeleitfähigkeit bei. (Abbildung 59)

Um zu überprüfen ob die Produkte optisch dicht sind, wurde der Emissionsgrad in verschiedenen Dicken und bei verschiedenen Hinterlegungen (Reflektierende Folie, schwarzer Lack) untersucht. Die Produkte sind bereits bei sehr geringen Schichtdicken optisch dicht (Abbildung 60). Der ermittelte Anteil der Wärmestrahlung ist demzufolge auf Absorption und Emission von Wärmestrahlung zwischen den Partikeln zurückzuführen. Optimierungsansätze zur Verbesserung der Opazität, bspw. durch den Zusatz von Trübungsmitteln sind daher nicht zielführend.

Basierend auf den Ergebnissen der initialen Beprobung wurden bestimmte Produktlinien weiter untersucht, um Zusammenhänge zwischen der Wärmeleitfähigkeit und den Herstellparametern herauszuarbeiten. Die im Projektverlauf entstandenen Datensätze wurden durch die Auswertung von Clustern unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, Korrelationsmatrizen und mit Methoden der multivariaten Datenanalyse untersucht.

Bei einer Auswertung der Siebanalysen konnte gezeigt werden, dass mit zunehmend schlankerer Verteilung der Massenanteile (Q_dist_80_20) über den Siebgrößen und geringen mittleren

Siebgrößen (QUANT_50, QUANT_80) die Wärmeleitfähigkeit sinkt. Der Effekt ist bei den flexiblen Matten (Abbildung 95) ausgeprägter als bei den Platten aus dem Trockenverfahren (Abbildung 87). Der produktbezogene Unterschied könnte damit erklärt werden, dass die Platten aus dem Trockenverfahren in einem Rohdichtebereich liegen, in dem der Einfluss der Dichte auf die Wärmeleitfähigkeit dominiert. Ein Einfluss des Feinanteils (QUANT_20) war bei beiden Produkttypen vorhanden, aber weniger stark ausgeprägt.

Bezüglich der Produktionsparameter der Zerfaserung zeigt sich insbesondere ein Einfluss der spezifischen Energie im Defibrator (I_defi_spez) und der Intensität des Aufschlusses im Kocher (SF). Interessant für Optimierungen der Produktion sind spezifische Zusammenhänge bspw. zwischen der Kochzeit und der Fasermasse sowie der Fasermasse und der spezifischen Stromaufnahme.

Im Laufe des Projekts wurden auch Segmente unterschiedlicher Hersteller untersucht. Weder bei den Platten aus dem Trockenverfahren (Abbildung 88), noch bei den flexiblen Matten (Abbildung 96) zeigte sich ein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Ebenfalls ohne Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit war die Standzeit der Segmente. Es zeigten sich jedoch mit voranschreitender Standzeit höhere spezifische Stromaufnahmen.

Eine interessante Erkenntnis betrifft die Ausbildung von Rohdichteprofilen bei den flexiblen Matten. Da die Ermittlung von Rohdichteprofilen mittels Röntgenstrahlung mit dem verfügbaren Gerät erst ab einer Dichte von ca. 100 kg/m^3 funktioniert, wurden die Matten geslict und die Rohdichteprofile gravimetrisch ermittelt. Wider Erwarten zeigte sich auch bei den flexiblen Matten ein relativ ausgeprägtes Rohdichteprofil (Abbildung 99).

Als Zielgrößen für die durchgeführten Industrieversuche wurden ein möglichst guter Faseraufschluss mit einem hohen SF und hoher spezifischer Stromaufnahme sowie ein möglichst flaches Rohdichteprofil definiert. Außerdem wurde anhand von Platten aus einem Laborverfahren der Einfluss unterschiedlicher Partikelkollektive auf die Wärmeleitfähigkeit bei ansonsten gleichen Herstellbedingungen, insbesondere bei gleicher Rohdichte, untersucht.

Bei dem ersten Industrieversuch wurde deutlich, dass die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten an von Hand eingestreuten Proben deutlich größeren Schwankungen unterworfen waren, als die Versuche an gebundenen Mustern (Abbildung 107). Zur Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Partikelkollektive auf die Wärmeleitfähigkeit bedarf demnach die Homogenität der Mattenbildung besonderer Beachtung. Die im Labor hergestellten Muster ließen folgende Schlüsse zu. Bezüglich der erzielten SF zeigte sich ein Optimalbereich. Ein Teil der Fasern wurde fraktioniert (Grob, Mittel, Fein) und es wurden Matten aus Teilkollektiven hergestellt. Dabei zeigte eine Absiebung des Grobanteils den größten Einfluss. Die Wärmeleitfähigkeit von Matten aus der Fein- oder Mittelfraktion zeigte jeweils niedrigere Werte als Mischungen aus Mittel- und Feinfraktion (Abbildung 114). Die Ergebnisse bestätigen damit den positiven Einfluss einer möglichst engen Fasergrößenverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit. Außerdem zeigte sich ein Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit. Eine langsame Verdichtung sollte dabei ein gering ausgeprägtes Rohdichteprofil bewirken. Die Wärmeleitfähigkeit reduzierte sich entsprechend (Abbildung 115).

In drei weiteren Industrieversuchen wurde versucht unter industriellen Herstellbedingungen einen möglichst guten Aufschluss mit niedriger Verdichtungsgeschwindigkeit zu kombinieren. Im Industrieversuch IV wurde mit einem hohen SF, einer hohen spezifischen Stromaufnahme und einer geringen Bandgeschwindigkeit eine sehr definierte Faserverteilung mit geringem Feinanteil (Abbildung 124) und eine Matte mit sehr gering ausgeprägtem Rohdichteprofil erzeugt. An den hergestellten Matten konnte die innerhalb der Industrieversuche geringste Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Aufgrund der Überlagerung der Effekte von Faseraufschluss und Rohdichteprofil kann die Signifikanz des Einflusses des Rohdichteprofils auf die Wärmeleitfähigkeit flexibler Matten aber nicht abschließend bestätigt werden.

Eine zusammenfassende Auswertung der Daten aus den Industrieversuchen ermöglicht aber die Abbildung des Einflusses der mittels 2D-Scanner ermittelten Faserlänge und -breiten auf die Wärmeleitfähigkeit. Unter Ausschluss der Variante LLF24, die ein deutlich abweichendes Verhalten zeigte, ergeben sich sehr strenge Korrelationen zwischen der Wärmeleitfähigkeit und SF (R = -0.9), der spezifischen Stromaufnahme (R = -0.8) sowie dem Median der Länge und Breite aus den Untersuchungen mit dem 2D-Scanner (R = 0.9). (Abbildung 131)

Das Gesamtziel der Arbeiten zur Charakterisierung mit bildgebenden Verfahren, Modellierung und Simulation ist die Entwicklung einer Struktur-Eigenschafts-Beziehung, um aus der geometrischen Mikrostruktur, die im Herstellungsprozess gezielt eingestellt werden kann, die makroskopischen Wärmetransporteigenschaften vorherzusagen. Diese Arbeiten führen zur Digitalisierung der Materialentwicklung bzw. Materialentwicklung und das Ergebnis dieser Arbeiten wird als Digitaler Zwilling (digital twin) bezeichnet.

Ein Alleinstellungsmerkmal in diesem Projekt ist es, dass nicht ein spezifisches Produkt, sondern eine ganze Produktpalette und unterschiedliche Herstellungsverfahren untersucht wurden. Deshalb waren sehr umfangreiche Forschungsarbeiten für alle Teilschritte notwendig. Die Kombination der im Projekt verfolgten datenbasierten und modellbasierten Ansätze hat zu neuen Erkenntnissen geführt, die zur Materialeinsparung bzw. Produktoptimierung dienen.

Da die Holzfasermaterialien eine hierarchisch aufgebaute Mikrostruktur besitzen, wurden unterschiedliche Bildgebungsverfahren (Synchrotron, µ-CT) eingesetzt, um die verschiedenen Größenskalen zu erfassen und zu berücksichtigen. Die binarisierten Synchrotronaufnahmen wurden weiterhin als Berechnungsgebiet bzw. repräsentatives Volumenelement (RVE) verwendet, um über die Lösung der Wärmeleitgleichung die makroskopische Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Aus der Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnissen und entsprechenden Messwerten ergab sich, dass diese Aufnahmen zur Digitalisierung herangezogen werden können.

Um ohne vorherige Herstellung von Proben, für realistische Mikrostrukturen des Fasermaterials, die Struktur-Eigenschafts-Beziehung zu bestimmen, wurde wie folgt vorgegangen: Aus den 3D-Bilddaten wurden über Segmentierungsverfahren Objekte (Fasern, Faserbündel, Faserkonglomerate) gewonnen. Im nächsten Schritt wurden diese Objekte im Computer approximiert. Danach wurden die approximierten Objekte im RVE genau so angeordnet, dass die künstlich erzeugte Mikrostruktur mit der Bildaufnahme übereinstimmt. Dabei ist Übereinstimmung in dem Sinne zu verstehen, dass ein

mathematisches Maß zur Beschreibung der Orientierung der Objekte gleich ist (Mikrostruktursimulation). Das Ergebnis ist ein digitales Materialmodell, welches (im Vergleich zum binarisierten 3D-Bild) parametrisiert ist. Für einen berechneten Parametersatz stimmt die simulierte Mikrostruktur sehr gut mit einer realen Mikrostruktur überein. Über die Variation der Parameter (z.B. Faserdicke, Faserlänge) kann nun qualitativ und auch quantitativ der Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit vorhergesagt werden.

Bei der physikalischen Modellierung des Wärmetransports wurde der Einfluss von Wärmestrahlung und Konvektion untersucht. Die Konvektion hat bei allen betrachteten Materialvarianten einen sehr geringen Anteil am Wärmetransport und wurde deshalb im weiteren Projektverlauf in den Modellen vernachlässigt. Die Wärmestrahlung hat einen größeren Anteil am Wärmetransport, der mit abnehmendem Festkörperanteil (Dichte) sogar noch zunimmt. Deshalb wurden zur Wärmestrahlung komplizierte messtechnische Untersuchungen durchgeführt. In den physikalisch-mathematischen Modellen wurde in diesem Projekt die Wärmestrahlung nicht berücksichtigt, weil dazu weitere messtechnische Untersuchungen notwendig gewesen wären, deren Realisierung kaum möglich erschien. In einem Folgeprojekt sollte der Anteil der Wärmestrahlung bei Materialien mit geringer Dichte unbedingt untersucht werden. Daraus würde sich ein weiteres Optimierungspotenzial hinsichtlich Materialeinsparung ergeben.

Der große und entscheidende Vorteil der im Projekt gewählten Vorgehensweise mit den im Computer generierten Mikrostrukturen besteht darin, dass einzelne Parameter (Dichte bzw. SVF, Orientierung von Fasern und Faserbündeln, Länge und Dicke der Fasern) geändert werden können und deren Sensitivität auf die makroskopischen Eigenschaften damit analysiert werden kann (siehe Abbildung 80). Mit dieser Methodik wurde im Projekt nachgewiesen, dass für die Materialien aus dem Nassverfahren und Trockenverfahren eine Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Dichte (Solid Volume Fraction SVF) besteht. Bei dem BiCo-Flex-Material, das eine geringere Dichte besitzt, ist das nicht der Fall. Wie in Abbildung 80 gezeigt wird, gibt es weitere sensitive Parameter (z.B. die Orientierung der Fasern und Faserbündel), die bei einer geringeren Dichte zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit (in eine Richtung) führen können.

Mit Hilfe von 3D-Bildaufnahmen wurden im Projekt systematisch realistische Mikrostrukturen der komplizierten Faserdämmstoffe simuliert. Auf Basis dieser Mikrostrukturmodelle wurde die Wärmeleitfähigkeit simuliert. Diese Methodik lässt sich auf andere Dämmstoffe oder ähnliche Faser-Materialien übertragen.

IX.2 Verwertung

Verwertbare Erkenntnisse ergeben sich aus der Anwendung der ermittelten relevanten Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit.

Von großem Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ist der Anteil des Grobgutes (Shives). Insbesondere die Orientierung der Längsachse der Shives (in Plattenebene oder senkrecht dazu), ist von Einfluss auf die Wärmeübertragung in der Mikrostruktur. Senkrecht zur Plattenebene orientierte Shives stellen Wärmebrücken dar, die zu einer Erhöhung der Wärmeübertragung führen. Optimierungsansätze

bestehen nun darin den Anteil von Shives zu reduzieren und eine Orientierung der Shives in Plattenebene zu fördern.

Günstige Faserkollektive im Sinne einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit sind außerdem gekennzeichnet durch eine möglichst schlanke Verteilung der Fasergrößen. Der Effekt war gleichermaßen ablesbar für Massenverteilungen aus Siebanalysen, als auch für Faserlängen und Faserbreitenverteilungen aus 2D-Scans. Entsprechende Vorgaben könnten zur Einstellung der Anlagen und der Kontrolle des Produktionsprozesses entwickelt werden. In diesem Sinne wäre eine kontinuierliche Erhebung von Fasergrößen mittels optischer Verfahren während der Produktion hilfreich.

Bezüglich der relevanten Herstellparameter zur Beeinflussung der Fasergrößen wurde der Einfluss der Hackschnitzelplastifizierung im Kocher sowie der spezifischen Mahlenergie im Refiner herausgearbeitet. Teilweise zeigten sich physikalische Grenzen bei der Bereitstellung der notwendigen Medien.

Weiteres Optimierungspotential ergibt sich aus der Erkenntnis, dass auch flexible Matten ein relevantes Rohdichteprofil aufweisen. Im Sinne einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit ist ein möglichst flaches Rohdichteprofil anzustreben. Im Projekt wurde die grundsätzliche Möglichkeit einer Beeinflussung des Rohdichteprofils durch die Anpassung der Verdichtungsgeschwindigkeit in z-Achse der Matten bestätigt. Um einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu ermöglichen ist jedoch eine entsprechend ausgelegte Vorpresse notwendig.

Ebenfalls interessant ist die Veränderung der Fasergrößenverteilung der Partikelkollektive durch die Zugabe des reject Anteils. Bei allen Varianten wurde durch die Zugabe des reject der Feinanteil erhöht und die Verteilungscharakteristik von Faserlängen und -breiten veränderte sich. Im Sinne einer diversifizierten Produktion könnte der reject Anteil gezielt nur solchen Plattenvarianten zugeführt werden, die bezüglich der zu erzielenden Wärmeleitfähigkeit unkritisch sind. Auf diese Weise würde die Charakteristik der Fasergrößenverteilungen bei einer hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit optimierten Platte, bzw. Matte unbeeinflusst bleiben.

IX.3 Erkenntnisse von Dritten

Während der Projektlaufzeit wurden keine Erkenntnisse von Dritten bekannt, die über den beschriebenen Stand des Wissens hinausgehen.

IX.4 Veröffentlichungen

Dobrovolskij D., Engelhardt M., Rack A., Schladitz K.: Shape classification for wood based insulation material. Vortrag, International Conference on Tomography of Materials & Structures (ICTMS) 2019, 23.07.2019, Cairns, Australien

Treml S., Engelhardt M., Windeisen, E. *Wood-fibre panels as core material for VIP*. IVIS Kyoto 2019, 14th International Vacuum Insulation Symposium, September 19-20, 2019, Proceedings, Edited by Atsushi Iwamae, Daisuke Ogura and Masaru Abuku

Literatur

[Altendorf und Jeulin 2011]
Altendorf, H.; Jeulin, D.: Random-walk-based stochastic modeling of three-dimensional fiber systems. Phys. Rev. E 83, 041804, 2011

[Amstutz und Andrä 2006]
Amstutz, S.; Andrä, H. (2005): A new algorithm for topology optimization using a level-set method, *Journal of Computational Physics,* Bd. 216, Nr. 2, pp. 573-588, 2006.

[Andrä et al. 2009]
Andrä, H.; Kabel, M.; Spies, M.; Rieder, H. (2009): Optimization of multilayered porous acoustic absorbers, in *Proc. NAG/DAGA 2009, International Conference on Acoustics, Rotterdam (NL)*, 2009.

[Andrä et al. 2013a]
Andrä, H.; Combaret, N.; Dvorkin, J.; Glatt, E.; Han, J.; Kabel, M.; Keehm, Y.; Krzikalla, F.; Lee, M.; Madonna, C.; Marsh, M.; Mukerji, T.; Saenger, E.H.; Sain, R.; Saxena, N.; Ricker, S.; Wiegmann, A.; Zhan, X. (2013): Digital rock physics benchmarks. Part I: Imaging and segmentation, *Computers \& Geosciences ,* Bd. 50, Nr. 0, pp. 25-32, 2013.

[Andrä et al. 2013b]
Andrä, H.; Combaret, N.; Dvorkin, J.; Glatt, E.; Han, J.; Kabel, M.; Keehm, Y.; Krzikalla, F.; Lee, M.; Madonna, C.; Marsh, M.; Mukerji, T.; Saenger, E.H.; Sain, R.; Saxena, N.; Ricker, S.; Wiegmann, A.; Zhan, X. (2013): Digital rock physics benchmarks. part II: Computing effective properties, *Computers \& Geosciences ,* Bd. 50, Nr. 0, pp. 33-43, 2013.

[Andrä et al. 2014]
Andra, H; Gurka, M; Kabel, M; Nissle, S.; Redenbach, C.; Schladitz, K; Wirjadi, O. (2014): Geometric and Mechanical Modeling of Fiber-Reinforced Composites. In: Dominique Bernard, Jean-Yves Buffière, Tresa Pollock, Henning Friis Poulsen, Anthony Rollett und Michael Uchic (Eds.): Proceedings of the 2nd International Congress on 3D Materials Science (3DMS). Annecy, 29.06.-02.07, pp. 35–40, John Wiley & Sons, 2014.

[Baehr und Stephan 1994]
Baehr, H.D.; Stephan, K. (1994): Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag 1994

[Brasch und Free 1965]
Brasch, D.J.; Free, K.W. (1965): Prehydrolysis-kraft pulping of Pinus radiata grown in New Zealand. In: Tappi 48(4), S. 245–248

[Cammerer 1995]
Cammerer, W.F. (1995): Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Auflage, Berlin

[Easwaran et al. 2015]

Easwaran, P.; Redenbach, C.; Schladitz, K.; Wirjadi, O.: Stochastic modeling of 3D fiber systems with fiber bundles and parameter estimation from CT image data. 14th International Congress of Stererology and Image Analysis, Liège, Belgium, 2015.

[Eitelberger und Hofstetter 2011]
Eitelberger, J.; Hofstetter, K. (2011): Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part I: Thermal conductivity. Composites Sciene and Technology 71 (2011), pp 134-144

[Esdorn 2008]
Esdorn, H. (2008): Rietschel. Raumklimatechnik. Band 1: Grundlagen. 16. Auflage, Autorenkollektiv, Herausgegeben von Horst Esdorn, Springer-Verlag 2008

[Ewing et al. 2009]
Ewing, R.; Iliev, O.; Lazarov, R.; Rybak, I.; Willems, J. (2009): A simplified method for upscaling composite materials with high contrast of the conductivity, *SIAM J. Sci. Comp.,* Bd. 31, pp. 2568-2586, 2009.

[FAO 2013]
FAO (2013): http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD (Abruf am 08.07.2013; Unterkategorie “Forestry Production and Trade”, Germany, Elements: Production (m3) Import quantity (m3), Export quantitiy (m3), Items: Insulating boards, Years: all

[Fengel und Wegener 1989]
Fengel, D.; Wegener, G. (1989): Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. New York: de Gruyter, 1989

[Fisher et al. 1987]
Fisher, N.; Lewis, T.; Embleton, B. (1987): Statistical Analysis of Spherical Data. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1987

[Franke et al. 2016]
Franke, J.; Redenbach, C.; Zhang, N. (2016). On a mixture model for directional data on the sphere. Scandinavian Journal of Statistics. 43, (1), 139-155.

[GDI 2013]
GDI (2013): Zusammenstellung der Daten zur Baumarktstatistik des GDI, 2013

[GeoDict 2021]
GeoDict – Das digitale Materiallabor. Version 2021, Math2Market GmbH, Kaiserslautern, Deutschland, URL https://www.geodict.com, Zugriff am 05.09.2021

[Ginzburg und Steiner 2002]
Ginzburg I.; Steiner, K. (2002): A free-surface lattice Boltzmann method for modelling the filling of expanding cavities by Bingham fluids., *Philos Transact A Math Phys Eng Sci,* Bd. 360, Nr. 1792, pp. 453-466, Mar 2002.

[Ginzburg und Steiner 2003]
Ginzburg, I.; Steiner, K. (2003): Lattice Boltzmann model for free-surface flow and its application to filling process in casting.}, *J. Comput. Phys. ,* Bd. 185, Nr. 1, pp. 61-99, 2003.

[Grigull und Sandner 1986]
Grigull, U.; Sandner, H. (1986): Wärmeleitung. Nachdruck der 1. Auflage 1979, Springer-Verlag 1986

[Gröber et al. 1981]
Gröber, H.; Erk, S.; Grigull, U. (1981): Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. 3. Auflage von Ulrich Grigull, 3. Neudruck, Reprint, Springer-Verlag 1981

[Grosser 1977]
Grosser, D. (1977): Die Hölzer Mitteleuropas. Springer-Verlag 1977

[Heinrich 2004]
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.

[Hoffmann 2007]
Hoffmann, L.M. (2007): On Weak Stationarity and Weak Isotropy of Processes of Convex Bodies and Cylinders. Advances in Applied Probability, Vol. 39, No. 4, pp. 864-882, 2007

[IC 2013]
IC (2013): IC Market Forecast. Thermal Insulation in Germany. June 2012. IC Interconnection Consulting, Wien

[Iliev und Rybak 2005]
Iliev, O.; Rybak, I. (2005): On numerical upscaling of flow in anisotropic porous media, 2005, pp. 1162-1165.

[Iliev und Rybak 2008]
Iliev, O.; Rybak, I. (2008): On numerical upscaling for flows in heterogneous porous media, *Comput. Methods Appl. Math.,* Bd. 8, pp. 60-76, 2008.

[Iliev et al. 2007]
Ilev, O.; Rybak, I.; Willems, J. (2007): On upscaling heat conductivity for a class of industrial problems, 2007.

[Kollmann und Malmquist 1956]
Kollmann, F.; Malmquist, L. (1956): Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen. Holz Roh-Werkst, 14, 6, 201 – 204

[Kollmann und Cote 1968]
Kollmann, F.; Cote, W.A. (1968): Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood. Springer-Verlag 1968

[Kollmann et al. 1975]
Kollmann, F.; Kuenzi, E.W.; Stamm, A.J. (1975): Principles of Wood Science and Technology. II. Wood Based Materials. Springer-Verlag 1975

[Lampert 1967]
Lampert, H. (1967): Faserplatten. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1967

[Loga et al. 2011]
Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R. (2011): Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), Darmstadt, 18.11.2011

[Lönnberg 2009]
Lönnberg, B. (2009): Mechanical Pulping. Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy, Second Edition 2009

[Niskanen und Alava 1994]
Niskanen, K. J.; Alava, M. J. (1994): Planar random networks with flexible fibers. Phys. Rev. Lett. 73, no. 25, 3475-3478, 1994

[Ohser und Schladitz 2009]
Ohser, J.; Schladitz, K. (2009): 3d Images of Materials Structures - Processing and Analysis. Wiley-VCH, Weinheim, 2009

[Pfundstein et al. 2007]
Pfundstein, M.; Gellert, R.; Spitzner, M.H.; Rudolphi, A. (2007): Dämmstoffe. Grundlagen, Materialien, Anwendungen. Edition Detail, 1. Auflage 2007

[Redenbach und Vecchio 2011]
Redenbach, C.; Vecchio, I. (2011). Statistical analysis and stochastic modelling of fibre composites. Composites Science and Technology. 71, 107-112.

[Redenbach et al. 2012]
Redenbach, C.; Rack, A.; Schladitz, K.; Wirjadi, O.; Godehardt, M. (2012): Beyond Imaging: On the Quantitative Analysis of Tomographic Volume Data, Int. J. Materials Research, Vol. 103, No. 2,.217-227, 2012

[Redenbach et al. 2014]
Redenbach, C.; Schladitz, K.; Vecchio, I.; Wirjadi, O.: Image analysis for microstructures based on stochastic models. GAMM-Mitteilungen 37(2):281–305, 2014

[Rieber et al. 2010]
Rieber, G.; Wirjadi, O.; Mitschang, P. (2010): Correlation of permeability values with flow channel diameters determined by 3D-image analysis of a woven textile. In Proc. 10th Int. Conf. Flow Processes in Composites, 2010

[Roll 2010]
Roll, H. (2010): Optimierung des Faseraufschlusses im Refiner, Energierelevante Aspekte der

Refinerscheibentechnologie bei der MDF-Herstellung unter Berücksichtigung der Faserqualität. Teil 1: Holz-Zentralblatt 16: 423-424, Teil 2: Holz-Zentralblatt 17: 443-444

[Scheiding 2000]
Scheiding, W. (2000): Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserstoff. Holz Roh- Werkst 58, 177 – 181

[Schild und Willems 2011]
Schild, K.; Willems, W. (2011): Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewer-tung. 1. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

[Schladitz 2006]
Schladitz, K.; Peters, S.; Reinel-Bitzer, D.;Wiegmann, A.;Ohser, J. (2006): Design of acoustic trim based on geometric modeling and flow simulation for non-woven, *Comp. Material Sciences,* Bd. 38, pp. 55-66, 2006.

[Schladitz et al 2016]
Schladitz, K; Büter, A.; Godehardt, M.; Wirjadi, O.; Fleckenstein, J.; Gerster, T.; Hassler, U.; Jaschek, K.; Maisl, M.; Maisl, U.; Mohr, S.;Netzelman, U.; Potyra, T.; Steinhauser, M.: Non-Destructive Characterization of Fiber Orientation in Reinforced SMC as input for simulationbased design. Submitted to Composites Science and Technology, 2016

[Siegel et al. 1988]
Siegel, R.; Howell, J.R.; Lohrengel, J. (1988): Wärmeübertragung durch Strahlung. Teil 1: Grundlagen und Materialeigenschaften. Springer-Verlag 1988

[Siegel et al. 1991]
Siegel, R.; Howell, J.R.; Lohrengel, J. (1988): Wärmeübertragung durch Strahlung. Teil 2: Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und in Umhüllungen. Springer-Verlag 1991

[Svensson et al. 2006]
Svensson, I.; Sjöstedt-De Luna, S.; Bondesson, L. (2006): Estimation of Wood Fibre Length Distributions from Censored Data through an EM Algorithm, Scandinavian Journal of Statistics, Vol. 33, No. 3 (Sep., 2006), pp. 503-522

[Ökobaudat 2013]
Ökobaudat (2013): http://www.nachhaltigesbauen.de/oekobaudat/ (Abruf am 09.08.2013)

[Schunk et al. 2009]
Schunk C., Treml S., Tröger F. (2009): Lose Dämmstoffe aus Holz – Wärmeleitfähigkeit von speziell hergestellten Fräßspänen ausgewählter Holzarten. Eur J Wood Prod, 67, 4, S. 487 – 488

[Spiess und Spodarev 2011]
Spiess, M.; Spodarev, E. (2011): Anisotropic Poisson Processes of Cylinders. Methodology and Computing in Applied Probability, Volume 13, Issue 4, pp 801-819, 2011

[Sprengard et al. 2014]
Sprengard, Ch.; Treml, S.; Holm, A.; (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der

Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Hrsg.: Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München; Fraunhofer IRB Verlag 2014

[STEICO AG 2004]
Interne Untersuchung an Holzfaser-Dämmplatten

[Thömmes 2009a]
Thömmes, G.; Becker, J.; Junk, M.; Vaikuntam, A.K.; Kehrwald, D.; Klar, A.; Steiner, K.; Wiegmann, A. (2009): Numerical investigation of a combined lattice {B}oltzmann-level set method for three-dimensional multiphase flow, *International Journal of Computational Fluid Dynamics,* Bd. 23, Nr. 10, pp. 687-697, 2009.

[Thömmes 2009b]
Thömmes, G.; Becker, J.; Junk, M.; Vaikuntam, A.K.; Kehrwald, D.; Klar, A.; Steiner, K.; Wiegmann, A. (2009): A lattice {B}oltzmann method for immiscible multiphase flow simulations using the level set method, *J. Comput. Phys.,* Bd. 228, Nr. 4, pp. 1139-1156, 2009.

[Treml 2011]
Treml, S. (2011): Entwicklung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz. Dissertation, Technische Universität München, 2011

[VDI 2006]
VDI (2006): VDI-Wärmeatlas. 10. Auflage, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), Springer-Verlag 2006

[VDI 2008]
VDI (2008): VDI-Richtlinien. Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung. Berechnungsgrundlagen. VDI 2055, Blatt 1, September 2008

[Vogel 1999]
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 2011]
Vogel, K. (2011): Beschreibung und Verifizierung einer Methode zur Holzsiebung. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-FB 001494, http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4158.pdf

[Walberg et al. 2011]
Walberg, D.; Holz, A.; Gniechwitz, T.; Schulze, Th. (2011): Wohnungsbau in Deutschland – 2011. Modernisierungen oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“. Bauforschungsbericht Nr. 59, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V., 2011

[Wegener et al. 2010]
Wegener, G.; Pahler, A.; Tratzmiller, M. (2010): Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz. Ein Leitfaden. Holzforschung München, WZW, Technische Universität München, 2010

[Wenderdel 2015]
Wenderdel, C. (2015): Herstellung mehrschichtiger Faserplatten im Trockenverfahren mit kartonähnlichen Eigenschaften. DISS. ETH Nr. 22987, Doktorarbeit, ETH Zürich, 2015, https://doi.org/10.3929/ethz-a-010575472

[Wiegmann et al. 2012]
A. Wiegmann, A.; J. Becker, J.; E. Glatt, E.; S. Rief, S.; L. Cheng, L. (2012): GeoDict 2012 User Guide, 2012.

[Wirjadi 2009]
Wirjadi, O. (2009): Models and Algorithms for Image-Based Analysis of Microstructures. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2009).

[Wieser et al. 2015]

Wieser, C.; Prill, T.; Schladitz, K.: Multiscale simulation process and application to additives in porous composite battery electrodes. Journal of Power Sources 277 (2015), pp.64-75

[Losch et al. 2014]
Losch, K.; Schladitz, K.; Ballaschk, K.; Berek, H.; Aneziris, C.G.: Interrupted in-situ compressive deformation experiments on MMC foams in an XCT. Image, analysis & stereology 33 (2014), No.2, pp.131-145

[Wirjadi et al. 2014]
Wirjadi, O.; Godehardt, M.; Schladitz, K.; Wagner, B.; Rack, A.; Gurka, M.; Nissle, S.; Noll, A. (2014): Characterization of multilayer structures of fiber reinforced polymer employing synchrotron and laboratory X-ray CT. *International Journal of Materials Research,* doi: 10.3139/146.111082, 2014.

[Wirjadi et al. 2016]
Wirjadi, O.; Schladitz, K.; Easwaran, P.; Ohser, J.: Estimating fibre direction distributions of reinforced composites from tomographic images. Submitted to Image, analysis & stereology, 2016

[Zeitler 2000]
Zeitler, M. (2000): Allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten. Dissertation, Universität GHS Essen, 2000

[Ziesing 2013]
Ziesing, H.-J. (2013): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Projektnummer: 23/11, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V., Berlin, November 2013

[Zirkelbach et al. 2008]
Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Bludau, Ch. (2008): Design of mineral fiber durability test based on

hygrothermal loads in flat roofs. 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul, May 11-14th, 2008

Anhang

Teilvorhaben I

Physikalische Charakterisierung und Validierung

Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens

Die Arbeiten im Teilvorhaben 1 umfassen neben der Projektkoordination die physikalische Charakterisierung der Rohstoffe, Fasertypen und Plattenmaterialien hinsichtlich granulometrischer, thermischer, strömungsdynamischer und mechanischer Eigenschaften. Im Weiteren werden auch Untersuchungen zum thermischen Verhalten unter instationären Temperaturbedingungen bei baupraktischen Feuchten durchgeführt. Die Untersuchungen dienen der initialen Charakterisierung, zur Modellvalidierung sowie der Überprüfung der Ergebnisse der optimierten Versuchsmaterialien. Außerdem werden in Zusammenarbeit mit dem Teilvorhaben 2 die Modelle zur rechnerischen Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Klebestellen und Wärmestrahlung weiterentwickelt.

Bearbeitete Arbeitspakete

Charakterisierung der Rohstoffe, Fasertypen und Plattenmaterialien hinsichtlich granulometrischer, thermischer, strömungsdynamischer und mechanischer Eigenschaften (lose Fasern, Platten) Untersuchungen zum thermischen Verhalten unter instationären Temperaturbedingungen bei verschiedenen baupraktischen Feuchtegehalten.

Entwicklung von Wärmeleitfähigkeitsmodellen für Holzfasermaterialien unter Berücksichtigung von Klebestellen und Wärmestrahlung.

Charakterisierung der Rohstoffe, Fasertypen und Plattenmaterialien zur Modellvalidierung.

Virtuelles Materialdesign (Optimierung bzgl. Wärmeleitfähigkeit bei gebrauchstauglichen Festigkeiten.

Messung der Wärmeleitfähigkeit und mechanischer Eigenschaften der Faser-/Plattenvarianten.

Abschließende Auswertung der während dem Projekt aufgebauten Datensätze zur Korrelation zwischen Anlagenparametern, Werkstoffstrukturen und Wärmeleitfähigkeit.

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Es wurde eine umfangreiche physikalische Charakterisierung an einer breiten Variation von Holzfaserdämmstoffen durchgeführt. Zusammenhänge zwischen der Wärmeleitfähigkeit und produktions- sowie produktspezifischen Eigenschaften wurden ermittelt. Der Einfluss von Fasergrößen auf die Wärmeleitfähigkeit wurde herausgearbeitet. Positiv im Sinne einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit sind monomodale und möglichst schlanke Verteilungen der Faserlängen sowie möglichst schlanke Verteilungen der Faserbreiten. Gleichsinnige Aussagen ergeben sich für Massenverteilungssummen aus der Siebanalyse sowie daraus gebildete Quantile und Distanzmaße. Die Zugabe von reject Anteilen aus der Produktion verändert die Fasergrößenverteilungen. Es ergibt sich eine Erhöhung des Feinanteils sowie eine Verbreiterung der Faserlängenverteilungen. Beide Effekte können die

Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Die relevanten Wärmeübertragungsmechanismen sind die Wärmeleitung der Gasphase und der Strahlungsanteil. Die Produkte sind aber bereits bei geringen Schichtdicken optisch dicht, weshalb Ansätze zur Erhöhung der Opazität nicht sinnvoll sind. Hinsichtlich der Produktionsparameter wurde der Einfluss der Hackschnitzelplastifizierung und der spezifischen Stromaufnahme als relevant eingestuft. Abgeleitete Größen wie der Severity Factor differenzieren deutlicher als die Auswertung von Temperatur und Kochzeit. Der Einfluss der räumlichen Anordnung der Faserkollektive auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt sich deutlich bei einem Vergleich der Ergebnisse aus von Hand eingestreuten Proben im Vergleich zu Matten aus einem kontrollierten Laborprozess. Auch bei Produkten mit niedriger Rohdichte ist ein Rohdichteprofil erkennbar das ggf. von Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ist.

Teilvorhaben II

Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens

Ziel ist die grundständige Untersuchung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit holzfaserbasierter Dämmstoffe von der Mikrostruktur des Materials. Auf eine zu erstellende morphologische Modellierung auf Basis von µCT werden zu entwickelnde Algorithmen zur Modellierung der Wärmeübertragung angewandt, die neben der Wärmeleitung durch den Feststoffanteil auch Strahlung und Konvektion berücksichtigen. Die Modelle werden an einer breiten Materialvariation validiert. Mit Methoden des virtuellen Materialdesigns werden Potentiale zur Minimierung der Wärmeleitfähigkeit detektiert. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit wird die Aufklärung der Zusammenhänge zwischen Produktionsparametern, Fasermorphologie, Struktureigenschaften des Materials und daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit erwartet. Die Forschungsergebnisse sind für die Weiterentwicklung von Holzfaserdämmstoffen essentiell, um derzeit bestehende Nachteile gegenüber mineralischen und petrochemisch basierten Produkten, insbesondere in der Wärmeleitfähigkeit, zu überwinden. AP3: Mikro-CT Bildgebung u. morphologische Charakterisierung der Faser- und Plattenvarianten; AP4: Entwicklung von Wärmeleitfähigkeitsmodellen für Holzfasermaterialien unter Berücksichtigung von Faser-Faser-Kontaktstellen und Wärmestrahlung; AP5: Entwicklung stochastischer Geometriemodelle für Holzfasersysteme unter Berücksichtigung von Hohlfasern und Porenraummorphologie; AP 6: Bewertung des Einflusses der Produktionsbedingungen auf die Werkstoffstrukturen, erste Validierung der Modellierung; AP9: µCT Bildgebung ausgewählter Faser- und Plattenmaterialien sowie Modellierung der Wärmeleitfähigkeit und mechanische Festigkeit; AP10: Abgleich zw. gemessenen und gerechneten Eigenschaften zur Validierung des Modells; AP11: Virtuelles Materialdesign (Optimierung der Wärmeleitfähigkeit bei gebrauchstauglichen Festigkeiten); AP13: Messung der Wärmeleitfähigkeit und mechanische Eigenschaften, µCT Bildgebung ausgewählter Varianten

Bearbeitete Arbeitspakete

µCT Bildgebung und morphologische Charakterisierung der Faser- und Plattenvarianten.

Entwicklung von Wärmeleitfähigkeitsmodellen für Holzfasermaterialien unter Berücksichtigung von Faser-Faser-Kontaktstellen und Wärmestrahlung.

Entwicklung stochastischer Geometriemodelle für Holzfasersysteme unter Berücksichtigung von Hohlfasern und Porenraummorphologie, Anpassung dieser Modelle an der Kenngrößen aus AP2.

Bewertung des Einflusses der Produktionsbedingungen auf die Werkstoffstrukturen, erste Modellvalidierung.

µCT Bildgebung ausgewählter Faser- und Plattenmaterialien sowie Modellierung der Wärmeleitfähigkeit und der mechanischen Festigkeit.

Abgleich zwischen gemessenen und gerechneten Eigenschaften zur Validierung des Modells.

Virtuelles Materialdesign (Optimierung bzgl. Wärmeleitfähigkeit bei gebrauchstauglichen Festigkeiten).

Messung der Wärmeleitfähigkeit und mechanischer Eigenschaften. µCT Bildgebung ausgewählter Varianten.

Dokumentation und Berichterstattung.

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Da die Holzfasermaterialien eine hierarchisch aufgebaute Mikrostruktur besitzen, wurden mehrere 3D-Bildgebungsverfahren (Synchrotron, µ-CT) eingesetzt, um die verschiedenen Größenskalen zu erfassen. Die Synchrotron-Aufnahmen wurden als repräsentatives Volumenelement (RVE) verwendet, um über die Lösung der Wärmeleitgleichung die makroskopische Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Aus der Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnissen und entsprechenden Messwerten ergab sich, dass diese Aufnahmen zur Digitalisierung herangezogen werden können. Aus den 3D-Bilddaten wurden über Segmentierungsverfahren Objekte (Fasern, Faserbündel, Faserkonglomerate) gewonnen. Danach wurden die approximierten Objekte im RVE genau so angeordnet, dass die künstlich erzeugte Mikrostruktur mit der Bildaufnahme übereinstimmt. Über die Variation der Parameter (z.B. Faserdicke, Faserlänge) wurde mit dieser Methode qualitativ und auch quantitativ der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Wärmeleitfähigkeit vorhergesagt. Damit wurde nachgewiesen, dass für Materialien aus dem Nassverfahren und Trockenverfahren eine Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Dichte besteht. Bei höher porösen Materialvarianten (BiCo-Flex) ist das nicht der Fall. Weitere Parameter, wie z.B. die Orientierungen der Faserbündel, führen zu höheren Wärmeleitfähigkeiten. Die Einflüsse von Wärmestrahlung und Konvektion wurden untersucht. Die Konvektion hat bei allen betrachteten Materialvarianten einen sehr geringen Anteil am Wärmetransport und wurde in den Modellen vernachlässigt. Die Wärmestrahlung hat einen größeren Anteil am Wärmetransport, der mit abnehmendem Festkörperanteil (Dichte) sogar noch zunimmt. Mit Hilfe von 3D-Bildaufnahmen wurden im Projekt systematisch realistische Mikrostrukturen der komplizierten Faserdämmstoffe simuliert und deren Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität und Festigkeit berechnet. Diese Methodik lässt sich auf andere Dämmstoffe oder ähnliche Faser-Materialien übertragen.

Teilvorhaben III

Optimierung und Dokumentation der industriellen Produktionsverfahren

Ziele und Gegenstände des Teilvorhabens

Die Arbeiten im Teilvorhaben 3 umfassen insbesondere die Herstellung unterschiedlicher Fasertypen und Plattenmaterialien. Dabei werden zunächst Verfahren nach dem Stand der Technik angewendet, auf deren Grundlage die im TV 1 und 2 vorzunehmenden Charakterisierungen und Modellbildungen entwickelt werden. Im weiteren Projektverlauf erfolgt dann eine systematische Variation der Produktionsparameter um die Bandbreite an möglichen, herstellbaren Faserstrukturen zu untersuchen. In einem letzten Optimierungsschritt werden schließlich gezielt Fasermorphologien und Fasernetzwerke hergestellt, die entsprechend dem virtuellen Materialdesign in TV 2 eine verringerte Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig gebrauchstauglichen Festigkeiten aufweisen.

Bearbeitete Arbeitspakete

Herstellung verschiedener Fasertypen und Herstellung von Plattenmaterialien.

Systematische Variation der Produktionsbedingungen zur Herstellung gezielt veränderter Fasertypen und Faserorientierungen. Dokumentation der Produktionsbedingungen und der Rohstoffe.

Herstellung von optimierten Fasergeometrien durch Variation der Anlagenparameter und Herstellung von Plattenvarianten daraus. Dokumentation der Produktionsbedingungen und Rohstoffe.

Abschließende Herstellung von Referenzvarianten und Überprüfung der Stabilität der nötigen Produktionsbedingungen.

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Projekt wurde zunächst eine breite Variation an Holzfaserdämmstoffen unter kontrollierten Herstellungsbedingungen produziert. Im Projektverlauf wurde ein Monitoring der Produktionsbedingungen für zwei ausgewählte Produktionslinien aufgebaut. Die Produkte wurden einer erweiterten Untersuchung im Werk unterzogen. Interessante Muster wurden zur weiteren Untersuchung an die Projektpartner übergeben. Die ermittelten Datensätze wurden kontinuierlich gepflegt und zur statistischen Auswertung im TV I aufbereitet. In insgesamt fünf Industrieversuchen wurden gezielt veränderte Faser- und Platten- bzw. Mattenmuster hergestellt. Dabei wurden verschiedene Ansätze zur Optimierung der Produktionsparameter hinsichtlich der Aufschlussbedingungen im Kocher und Refiner sowie der Mattenbildung umgesetzt.