Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Innovativer Plattenwerkstoff aus Zuckerrübenschnitzel

„Vom Abfall zum Bauprodukt der Zukunft“

Masterarbeit

Verfasst von Benedikt Preschern

Betreut von:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.

Wolfgang Gindl-Altmutter

Fachlich mitbetreut von:

Dipl.-Ing. Eva-Marieke Lems

Institut für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Universität für Bodenkultur Wien

März 2020

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich während dem Verfassen dieser Arbeit in verschiedenster Form unterstützt und motiviert haben.

Mein Dank geht an erster Stelle sowohl an meine gesamte Familie, als auch an meine Freunde und Freundinnen, welche mir auch in schwierigen Zeiten meines Studiums immer den Rücken gestärkt haben und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Als nächstes möchte ich mich recht herzlich bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Wolfgang Gindl-Altmutter bedanken, welcher mir die Chance gegeben hat, meine Masterarbeit im Zuge eines interessanten Forschungsprojektes zu schreiben.

Mein besonderer Dank geht an Dipl.-Ing. Eva-Marieke Lems, welche mir von Anfang bis Ende, sowohl durch kompetente Beratung, als auch durch tatkräftige Unterstützung und Einschulung der benötigten Geräte immer zur Seite gestanden ist.

Zudem möchte ich mich bei allen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Holztechnologie und nachwachsende Rohstoffe als auch Wood K-Plus bedanken. Insbesondere bei Dr. Stefan Pinkl, Oliver Vay und dem gesamten Tischler - Team, welche mich während den Versuchen tatkräftig unterstützt und den Zuschnitt der Probekörper erledigt haben.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Wien, am 10.03.2020

Unterschrift
(Benedikt Preschern)

Abstract

This Master thesis is dealing with the production of boards based on sugar-beet-pulp with two target densities and three different quantities of urea-formaldehyde resin. Throughout the Master thesis, Heraklith® boards were used as a reference for the produced sugar beet pulp (SBP) boards. During the spraying of glue it was found that a higher water content in the resin had positive effects on the distribution of the resin, as it had a lower viscosity und thus can be better atomized. A higher water content also had positive effects during hot pressing of the boards due to swelling of the sugar beet pulp and therefore a higher pressing force. During the thermal conductivity test of sugar beet pulp boards, it was found that the results are comparable with commercially available natural fiber- and Heraklith® boards. To determine the fire resistance of the produced boards, six tests were executed for both target densities. Although there were no fire retardant substances added during the production, the sugar beet pulp boards did not catch fire even when tested longer than the standard test conditions recommend. The mechanical characterization in terms of modulus of rupture and modulus of elasticity was performed through a three point bending test. As the produced boards were compared with Heraklith® during the test, it can be said, that the outcome showed quite promising results.

Keywords: sugar beet pulp, renewables, building materials, fire resistant

Zusammenfassung

Im Rahmen der Masterarbeit wurden Platten aus getrockneten Zuckerrübenschnitzeln im Trockenverfahren mit zwei unterschiedlichen Zieldichten und jeweils drei Beleimgraden hergestellt. Während der gesamten Arbeit wurden Heraklith® Platten als Referenz zu den hergestellten Platten herangezogen. Beim Besprühen der Trockenschnitzel mit UF Harz stellt sich heraus, dass ein höherer Wassergehalt im Harz einen positiven Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der Beleimung hat, da es eine geringere Viskosität aufweist und somit besser zerstäubt werden kann. Auf den Pressvorgang hat ein höherer Wassergehalt ebenso einen positiven Effekt, da aufgrund des Quellverhaltens der Zuckerrübenschnitzel eine höhere Presskraft wirken kann. Während der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit stellt sich heraus, dass die Werte vergleichbar mit aktuell am Markt erwerblichen Naturfaserbaustoffen und Heraklith® Platten sind. Um die Brandresistenz der hergestellten Proben zu ermitteln, wurden pro Platte sechs Einzelflammtests durchgeführt. Obwohl während der Produktion in keiner Form Brandhemmende Stoffe hinzugefügt wurden, stellte sich heraus, dass die Platten aus Zuckerrübenschnitzeln selbst bei einem Test, der über die Normierte Testdauer hinaus andauert, nicht brennbar sind. Die mechanische Charakterisierung in Form von Biegefestigkeit und Biegeelastizitätsmodul erfolgt mittels drei-Punkt-Biegeversuch. Durch die mechanische Charakterisierung von Heraklith® entstehen Vergleichswerte, wobei die Biegefestigkeit der Zuckerrübenschnitzelplatten durchaus vielversprechend ausfällt.

Schlagwörter: Zuckerrübenschnitzel, nachwachsende Rohstoffe, Baumaterial, Brandschutz

Inhaltsverzeichnis

1. Abkürzungsverzeichnis 8
2. Einleitung 9
   2.1. Ziel der Arbeit 10
3. Material und Methoden 12
   3.1. Ausgangsmaterial 12
   3.2. Siebanalyse 12
   3.3. Beleimung 14
   3.4. Langzauner Laborpresse 15
   3.5. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest 16
   3.6. Einplatten – Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP 500 18
   3.6.1. Funktion und Aufbau des Gerätes 18
   3.6.2. Durchführung der Tests: 19
   3.7. Zwick Röll: Drei-Punkt Biegeversuch 20
   3.8. Statistischer Versuchsplan 22
4. Ergebnisse 23
   4.1. Ausgangsmaterial 23
   4.2. Siebanalyse 23
   4.3. Beleimen und verpressen 25
   4.3.1. Vorversuche 25
   4.3.2. Produktion 29
   4.3.2.1. Besondere Vorkommnisse bei der Produktion: 30
   4.4. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest 32
   4.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 36
   4.6. Drei-Punkt Biegeversuch 37
   4.7. Statistische Darstellung der Biegeprüfungsergebnisse 39
   4.7.1. Box Plots der ermittelten Biegefestigkeiten 39
   4.7.2. Biege-Elastizitätsmodul 40
5. Diskussion 42
   5.1. Ausgangsmaterial 42
   5.2. Siebanalyse 42
   5.3. Beleimen und verpressen 42
   5.3.1. Besondere Vorkommnisse bei der Produktion 43

5.4. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest 44
5.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 45
5.6. Drei-Punkt-Biegeversuch inkl. statistischer Auswertung 47
5.6.1. Biegefestigkeit 47
5.6.2. Biege-Elastizitätsmodul 50
6. Schlussfolgerungen 53
7. Literaturverzeichnis 55
8. Anhang 58
8.1. Feuchtebestimmung der Zuckerrübenschnitzel 58
8.2. Siebanalyse 59
8.3. Beleimen der Zuckerrübenschnitzel 60
8.4. Brandverhalten 64
8.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 67
8.6. Drei-Punkt-Biegeversuch 67
8.7. Statistische Auswertung des Drei-Punkt-Biegeversuchs 70
8.7.1. Biegefestigkeit 70
8.7.2. Biege-Elastizitätsmodul 74
9. Abbildungsverzeichnis 78
10. Tabellenverzeichnis 80

1. Abkürzungsverzeichnis

Atro = Absolut trocken

BG = Beleimgrad

IQA = Interquartilsabstand

SBP = Sugar beet pulp

UF = Urea Formaldehyd

ZRS = Zuckerrübenschnitzel

2. Einleitung

Die österreichische Landwirtschaft erntete im Wirtschaftsjahr 2016/17 3,5 Mio. t Zuckerrüben. Diese sind nach Getreide (5,7 Mio. t) das gewichtsmäßig zweitgrößte geerntete pflanzliche Produkt im Agrarsektor in Österreich (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2018).

Die AGRANA Zucker GmbH und Duraisam et al. (2017) erläutern, dass aus ca. 6 kg Zuckerrüben 1 kg Zucker gewonnen wird. Während der Zuckerherstellung entstehen einige Nebenprodukte, darunter z.b. Melasse und Zuckerrübenschnitzel (AGRANA Beteiligungs-AG 2016, Balama, Gillah und Mbwambo 2012). Es wurden bereits mehrere Studien durchgeführt, um neue Einsatzgebiete der Zuckerrübenschnitzel zu erforschen, wobei die Bereiche von der Kosmetikindustrie über die Biotreibstoffproduktion bis hin zum Einsatz von ZRS in Zement führen (Monreal, et al. 2011). Weitere Versuche mit ZRS wurden im Bereich Nanopapierherstellung und Kleber auf Basis fibrillierter Cellulose durchgeführt (Pinkl, et al. 2017).

Die Hauptbestandteile von Zuckerrübenschnitzeln sind in Abbildung 1 dargestellt.

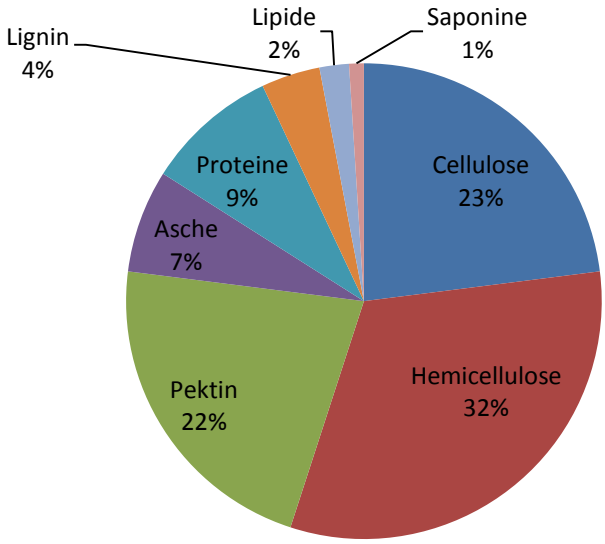

Abbildung 1: Zusammensetzung von Zuckerrübenschnitzeln (Karaky, et al. 2019).

Durch den hohen Anteil an Cellulose, Hemicellulose und Pektin haben die Zuckerrübenschnitzel sehr charakteristische, hygroskopische Eigenschaften, wodurch sich bei der Weiterverarbeitung einige Herausforderungen ergeben.

In Österreich sind die Zuckerrübenschnitzel ein Abfallprodukt aus der Zuckerherstellung, sie werden derzeit hauptsächlich verfüttert, als Dünger verwendet oder energetisch genutzt. Laut Umweltbundesamt GmbH (2018) sind die Hauptverursacher an CO_2 äquivalenten Emissionen in Österreich unter anderem die Bauindustrie und Mineralverarbeitende Industrie. In diesem Sektor kann durch alternative Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Dämmstoffe, Brandschutz, etc.) ein positiver Beitrag in Richtung Klimaschutz geleistet werden.

Das Spektrum an nachwachsenden Baustoffen ist mittlerweile sehr breit gefächert, es reicht von Schallschutz, über Wärmedämmung und Brandschutz, bis hin zu tragenden Konstruktionen. Die Firma Sonae Arauco bietet wärme- und schalldämmende Holzfaserplatten an, die durch ein asymmetrisches Rohdichteprofil hohe Stabilitäten aufweisen und somit als aussteifende Beplankung verbaut werden können. Zum Thema Brandschutz gibt es von der Firma Knauf zementgebundene Holzwolle-Leichtbauplatten, besser bekannt unter dem Namen Heraklith®. Wobei der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen (Holzwolle) unter 50% beträgt, denn eine 2,5 cm dicke Platte besteht in der Regel aus 4 kg Holzwolle und 6,5 kg Gips (Kollmann 1939).

Durch die Versuche von Karaky, et al. (2019) wurden bereits Zuckerrübenschnitzel – Kartoffelstärke Verbundwerkstoffe hergestellt, welche im Bereich der Schallabsorption und der hygrothermalen Eigenschaften durchaus gute Ergebnisse geliefert haben.

2.1. Ziel der Arbeit

Da bereits einige Studien zur alternativen Verwendung von Zuckerrübenschnitzeln unter anderem als Baustoff durchgeführt wurden, widmet sich diese Arbeit der Herstellung von innovativen Platten aus Zuckerrübenschnitzel.

Zu Beginn der Arbeit wird festgelegt, dass die hergestellten Endprodukte mit Heraklith® verglichen werden sollen, somit ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

Forschungsfrage 1: Können formstabile Platten aus Zuckerrübenschnitzel im Trockenverfahren hergestellt werden?

Forschungsfrage 2: Sind Platten aus Zuckerrübenschnitzel brennbar?

Forschungsfrage 3: Haben Platten aus Zuckerrübenschnitzel eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Heraklith?

Der Herstellungsprozess in dieser Arbeit ähnelt dem der Spanplattenherstellung, es werden aufgrund der Erkenntnisse von Kimoto et al. (1964) folgende Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 1: Ein höherer Beleimgrad hat einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

Hypothese 2: Eine höhere Rohdichte hat einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

Hypothese 3: Eine höhere Presstemperatur hat einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.

3. Material und Methoden

3.1. Ausgangsmaterial

Das Basismaterial zur Herstellung der Platten sind Zuckerrübenschnitzel, welche von der „Agrana Zucker GmbH“ in Tulln an der Donau bezogen werden. Die Anlieferung und Lagerung erfolgt in verschlossenen Behältern, so dass die Rübenschnitzel nicht in Kontakt mit Luft und Feuchtigkeit kommen. Der Trockengehalt wird mit einem Darrofen (105 °C) und einer Analysewaage bestimmt.

Die Beleimung des Ausgangsmaterials erfolgt mit Harnstoff-Formaldehyd (UF) Harz, wobei dieses eigenhändig abgemischt wird. Auf einer Digitalwaage (Genauigkeit 0,1 g) wird sowohl das UF - Pulver als auch das Wasser separat voneinander abgewogen und mittels Glasstäbchen vermischt bis keine Klumpen mehr sichtbar sind.

3.2. Siebanalyse

Da die angelieferten Zuckerrübenschnitzel keine konstante Teilchengröße haben, sondern sehr stark variieren, wird im ersten Schritt eine Siebanalyse nach DIN EN ISO 17827-2:2016 mit einem Siebturm der Marke Retsch, Type AS200 durchgeführt (Abbildung 2). Die Siebanalyse dient als Entscheidungshilfe, mit welcher Maschenweite bei der Produktion die kleinen Partikel abgeschieden werden sollen.

Der Siebturm ist wie folgt aufgebaut:

- 4 mm Drahtgewebe
- 3,15 mm Drahtgewebe
- 2 mm Drahtgewebe
- 1,4 mm Drahtgewebe
- 1 mm Drahtgewebe
- 0,4 mm Drahtgewebe
- 0,2 mm Drahtgewebe
- Sammelschale

Mit dieser Konfiguration des Siebturms wird die Gesamtmenge der zu testenden Zuckerrübenschnitzel in das oberste 4 mm Sieb eingefüllt und 30 Minuten bei einer Amplitude von 30% gerüttelt.

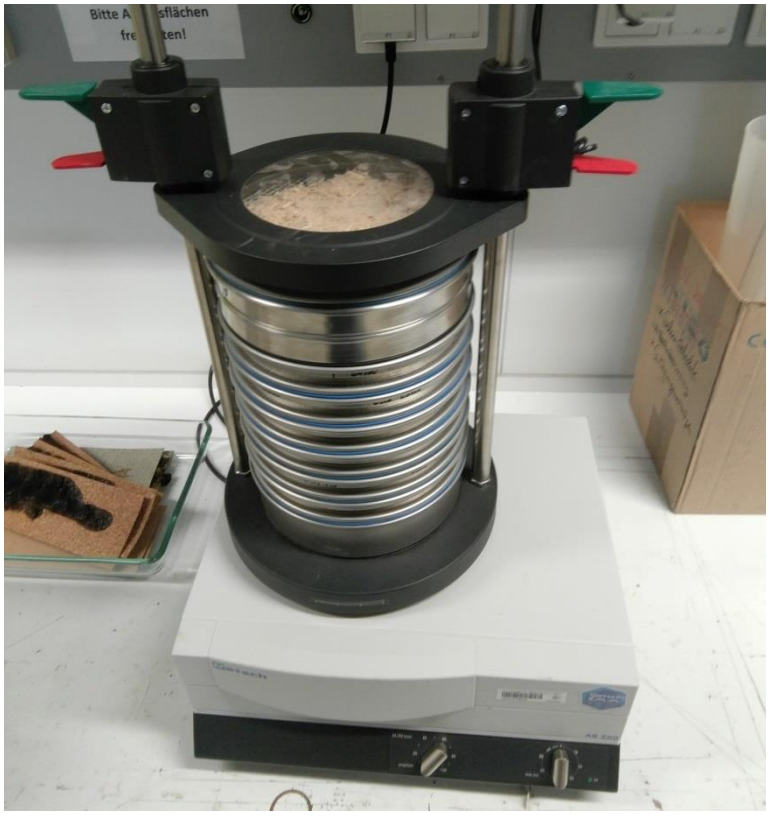

Abbildung 2: Siebturm Retsch AS200 mit Sieben von 4 mm bis 0,2 mm Maschenweite.

Im Anschluss werden die Fraktionen auf der Laborwaage laut Norm gewogen und eine Tabelle mit dem kumulativen durchgehenden Massenanteil erstellt. Anhand dieser Tabelle wird eine grafische Korngrößenverteilung erstellt. Die Fraktionen von 4 mm bis < 0,2 mm sind in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Fraktionen der Zuckerrüben - Trockenschnitzel

Da kleine Partikel bezogen auf ihr Gewicht eine sehr große Oberfläche haben und dadurch viel Klebstoff aufnehmen, wird für die Produktion ein Sieb mit 1 mm Maschenweite verwendet und zum Sieben eine große Rüttelplatte verwendet (Abbildung 4).

Abbildung 4: Rüttelplatte mit Trockenschnitzel

3.3. Beleimung

Das Beleimen der Trockenschnitzel erfolgt mittels UF – Harz mit der Bezeichnung „Prefere 10F152“ - durch eine Lackierpistole in einem Kunststoffbehälter. Um eine gleichmäßige Beleimung der Trockenschnitzel gewährleisten zu können, werden diese in regelmäßigen Abständen per Hand vermischt. Die besten Ergebnisse beim Besprühen werden mit einer 2,5 mm Düse erzielt, da der UF Leim eine höhere Viskosität im Vergleich zu Lacken aufweist.

Das Mischungsverhältnis wird vom Hersteller mit 5 : 3,5 (UF : Wasser) angegeben, jedoch dauert die Beleimung damit deutlich über 45 Minuten. Um dem Problem entgegenzuwirken, wird die Wassermenge Schritt für Schritt auf 30% (bezogen auf den Trockengehalt) erhöht, wodurch sich die Beleimzeit auf unter 20 Minuten reduziert. Die Beleimdauer hängt auch von der offenen Zeit des Klebstoffes ab, denn je länger die Viskosität gering bleibt, desto schneller erfolgt der Beleimvorgang.

In Abbildung 5 sind die unbeleimten und beleimten Trockenschnitzel gegenübergestellt.
Während dem Beleimen wird der Behälter mit den Trockenschnitzeln regelmäßig gewogen, um einen exakten Beleimgrad gewährleisten zu können.

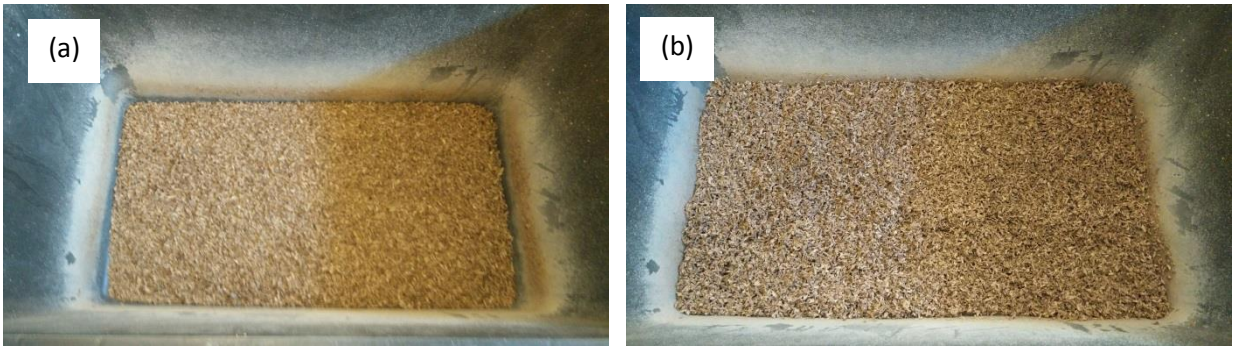

Abbildung 5: Unbeleimte (a) und beleimte (b) Trockenschnitzel.

3.4. Langzauner Laborpresse

Die beleimten Trockenschnitzel werden anschließend gleichmäßig in einen Holzrahmen, der auf einer 4mm starken Messingplatte steht, geschüttet und händisch vorgepresst, um einen stabilen Rübenschnitzelkuchen zu erhalten (Abbildung 6). Der Rahmen hat ein Innenmaß von 500 mm x 300 mm. Danach wird der Holzrahmen abgehoben, ein Trennpapier aufgelegt, zwei 25 mm hohe Distanzleisten seitlich vom Zuckerrübenschnitzelkuchen hingelegt und das gesamte Paket in die Presse gelegt.

(a) (b)

Abbildung 6: Beleimte Trockenschnitzel in Pressform (a) und vorgepresst (b)

Die Heizplatten der Presse werden oben und unten gleichermaßen auf 100 °C (in der zweiten Versuchsreihe auf 150 °C) erhitzt und die Presszeit wird mit 12,5 Minuten eingestellt (Faustformel für die Durchwärmzeit: $1\ \frac{min}{mm}$).

Nach dem Pressen werden die Platten zum Abkühlen vertikal in eine Vorrichtung gestellt, so dass an beiden Seiten gleichermaßen Luft zirkulieren kann, um ein Schüsseln der Platten zu vermeiden.

Sobald die Zuckerrübenplatten ausgekühlt sind, werden diese in den Klimaraum auf Stapelleisten gelegt, um sowohl einen gleichmäßigen Feuchtegehalt der Platte gewährleisten zu können, als auch eine Durchbiegung / Schüsselung zu vermeiden.

Die Platten verbleiben zwei Wochen im Klimaraum bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte.

3.5. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest

Bevor der Einzelflammtest durchgeführt werden kann, müssen die 500 mm x 300 mm großen Rohlinge zugeschnitten werden, um in die dafür vorgesehene Probenhalterung zu passen (Abbildung 7).

Die Proben sollen laut ISO/DIS 11925-2:2018 eine Länge von 250^{+2}_{-0} mm und eine Breite von 90^{+2}_{-0} mm haben.

Abbildung 7: Zugeschnittene Proben für den Einzelflammtest nach DIN EN ISO 11925-2. Heraklith® - Platte, Zuckerrübenschnitzelplatte mit 350 kg/m³ und Zuckerrübenschnitzelplatte mit 450 kg/m³ (v.l.n.r)

Das Brandverhalten der Probekörper wird in dieser Arbeit mittels Flächenbeflammung bestimmt. Um exakte und wiederholbare Tests durchführen zu können, wird bei jeder Probe der Brennerabstand mit der Lehre für die Flächenbeflammung eingestellt, siehe Abbildung 9.

Wenn alle zu prüfenden Platten vorbereitet und konditioniert sind, wird der Versuchsaufbau im Abzug aufgebaut (Abbildung 8).

Abbildung 8: Versuchsaufbau Einzelflammtest mit montiertem Prüfkörper für die Flächenbeflammung.

Im ersten Schritt wird der Prüfkörper in den Prüfhalter geschoben und mit Hilfe des Brenners und der Lehre auf der richtigen Höhe verschraubt. (Laut ISO/DIS 11925-2:2018 muss die Spitze der Lehre 40 mm über der Unterkante des Prüfkörpers sein, siehe Abbildung 9.)

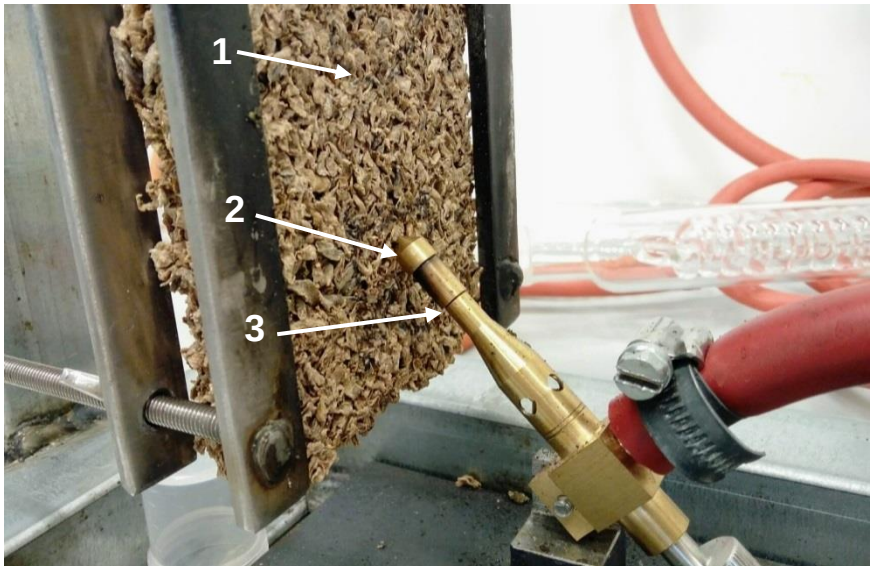

Abbildung 9: Position des Brenners mit der Lehre zur Einstellung des Brenners für die Flächenbeflammung.
1: Probenoberfläche, 2: Lehre für die Einstellung des Brennerabstandes, 3: Brenner

Die Position des Brenners wird mittels Anschlag eingestellt, so dass die Brennerposition nach dem Entfernen der Lehre wieder exakt angefahren werden kann.

Der Brenner wird angezündet und für einige Minuten unter dem Abzug brennen gelassen, so dass sich eine konstante Flamme ausbildet. Danach wird die korrekte Höhe der Flamme bestimmt (20 mm). Im Anschluss werden die Schiebetüren des Abzuges so eingestellt, dass die Flamme stabil brennt.

Laut Norm muss unter den Prüfkörper ein Filterpapier mit einer Dichte von $75 \pm 15\ \frac{g}{m^2}$ aufgelegt werden. Da kein Filterpapier zur Verfügung stand, wurde Kopierpapier mit einem Papiergewicht von $80\ \frac{g}{m^2}$ verwendet. Das Papier soll zeigen, ob herabfallende Brandrückstände dieses noch entzünden können, oder ob es sich nur um bereits abgekühlte Asche handelt.

Der Prüfablauf selbst dauert laut Norm nur 30 Sekunden. Der Schlitten mit dem Brenner wird langsam in Richtung Probekörper bewegt. Sobald die Flamme die Oberfläche berührt, wird die Zeit gestoppt. Nach 30 Sekunden wird der Brenner konstant vom Probekörper zurückgezogen und es wird beobachtet wie sich die Brandstelle verhält (Rauchbildung, weiterglühen, etc..). Geprüft werden sowohl drei ZRS-Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und 450 kg/m³ als auch drei Heraklith® - Platten als Referenz. Der Einzelflammtest nach ISO/DIS 11925-2:2018 wird an jedem Probekörper beidseitig durchgeführt, um in Summe sechs Vergleichswerte pro Zieldichte zu erhalten.

Dieser Versuch wird in Kapitel 4.4 auf 10 Minuten verlängert, um zu sehen, wie sich eine längere Brandeinwirkung auf die Probekörper auswirkt.

3.6. Einplatten – Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP 500

3.6.1. Funktion und Aufbau des Gerätes

Das Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500e ist ein Messgerät auf Basis eines Embedded-PCs zur Durchführung von Absolutwertmessungen nach dem Einplattenverfahren. Es misst die Probendicke **d** der eingelegten Probe, die Temperaturdifferenz **ΔT** über die Probe und der dem Wärmestrom **Q** äquivalenten elektrischen Leistung der Messheizung P (= **U * I**) und bestimmt mit der definierten

Messfläche **A** gemäß der eindimensionalen, stationären Wärmeleitung die Wärmeleitfähigkeit wie folgt (http://www.lambda-messtechnik.de/ 2019):

$$\lambda = \frac{\dot{Q} * d}{A * \Delta T} = \frac{U * I * d}{A * \Delta T}$$

3.6.2. Durchführung der Tests:

Das Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät „λ-Meter EP 500“ ist in Abbildung 10 dargestellt. Die zu prüfenden Platten werden so groß wie möglich besäumt, im Idealfall auf 500mm x 300 mm, was jedoch aufgrund der Porosität an den Kanten nicht möglich ist. Um das thermische Feld einstellen zu können, muss die gesamte Prüffläche der Maschine abgedeckt werden. Um das gewährleisten zu können, werden neben der zu prüfenden Probe jeweils identisch hohe Zuckerrübenschnitzelplatten platziert, welche zuerst in der Dicke vermessen, danach besäumt und mittig der Länge nach getrennt werden und im Anschluss neben die zu prüfende Probe gelegt werden (Abbildung 10).

Der Test wird anfangs mit drei Plattenmittentemperaturen gemessen (10°C, 25°C und 40°C). Da der Test damit über 24 Stunden dauert, werden die darauffolgenden Platten nur mehr mit einer Kerntemperatur (T_{Kern}) von 10°C gemessen. Wie man in Abbildung 10 erkennen kann, sind die Probekörper in dünne Folie gewickelt um Feuchteverluste bzw. Feuchteaufnahmen zu vermeiden. Der Einfluss der dünnen Folie ist vernachlässigbar, wie in (Troppová, et al. 2015) beschrieben wird.

Vor dem ersten Messen wird das Gerät in der Dicke kalibriert, um sicher gehen zu können, dass die Stärke der Platten korrekt wiedergegeben wird. Dazu wird die obere Platte nach unten gefahren, bis ein Signalton drei Mal ertönt. Sollte die angezeigte Dicke etwas anderes als „0“ anzeigen, kann dies jetzt korrigiert werden.

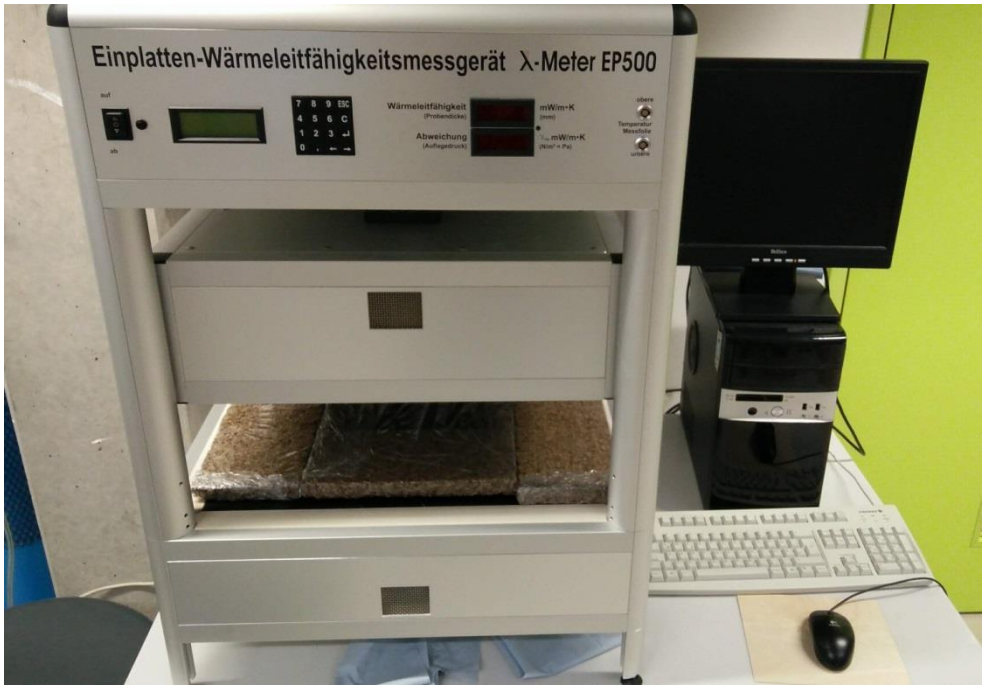

Abbildung 10: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500

Vor dem Einlegen und einwickeln der Probekörper, müssen die Abmaße und das Gewicht bestimmt werden. Die Länge, Breite und die Masse der Platten werden vor dem Prüfvorgang ins Programm übertragen, somit kann Das Gerät über die Dicke die korrekte Dichte des Prüfkörpers berechnen. Im Anschluss können die eingepackten Probekörper aufgelegt und mit dem Test begonnen werden. Vorversuche haben ergeben, dass die Messungen mit 25 °C und 45 °C Kerntemperatur nicht durchgeführt werden müssen, da zum einen die Ergebnisse dieselben sind und zum anderen die Messungen länger als 24 Stunden dauern.

3.7. Zwick Röll: Drei-Punkt Biegeversuch

Um die hergestellten Platten aus Zuckerrübenschnitzel mechanisch charakterisieren zu können, werden 3 – Punkt Biegeversuche nach DIN 52186 durchgeführt.

Nachdem alle Zuckerrübenplatten im Klimaraum bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit eine konstante Ausgleichsfeuchte erreicht haben (mindestens 14 Tage), können die Rohlinge auf allen Seiten besäumt und einheitlich mittig mit einer Kreissäge getrennt werden. So entstehen in Summe 120 Prüfkörper die folgende Merkmale aufweisen:

- Zieldichte 350 kg/m³ und 450 kg/m³
- Beleimgrad von 6%, 8% und 10%
- Presstemperaturen: 100 °C und 150 °C
- Heraklith® - Platten als Referenz

In Abbildung 11 ist der Versuchsaufbau ersichtlich. Der Auflagerabstand beträgt 400 mm, es wurde eine 10 kN Kraftmessdose verwendet, welche für diese Versuche eine geringe Auflösung aufweist. Beim Prüfvorgang werden trotzdem ausreichend genaue Ergebnisse erzielt, wie man später in den Ergebnissen erkennen kann.

Bevor die Prüfvorgänge durchgeführt werden, muss die Maschine gerüstet und die Norm im Programm ausgewählt werden, als auch die zur Prüfung notwendigen Parameter eingestellt werden, wie zum Beispiel die Prüfgeschwindigkeit. Diese wird anhand von Teststücken eingestellt, so dass diese bei allen Prüfkörpern mit 90 Sekunden ± 30 Sekunden eingehalten wird.

Abbildung 11: Drei - Punkt Biegeprüfung nach DIN 52186. Auflagerabstand 400 mm.

Um eine geringe Feuchtedifferenz beim Prüfvorgang gewährleisten zu können, werden maximal 8 Probekörper aus dem Klimaraum entnommen und der Biegeversuch so schnell wie möglich durchgeführt. Bei der Entnahme der Proben aus dem Klimaraum wird die die Temperatur mit 23°C und die relative Luftfeuchte mit 64% abgelesen.

3.8. Statistischer Versuchsplan

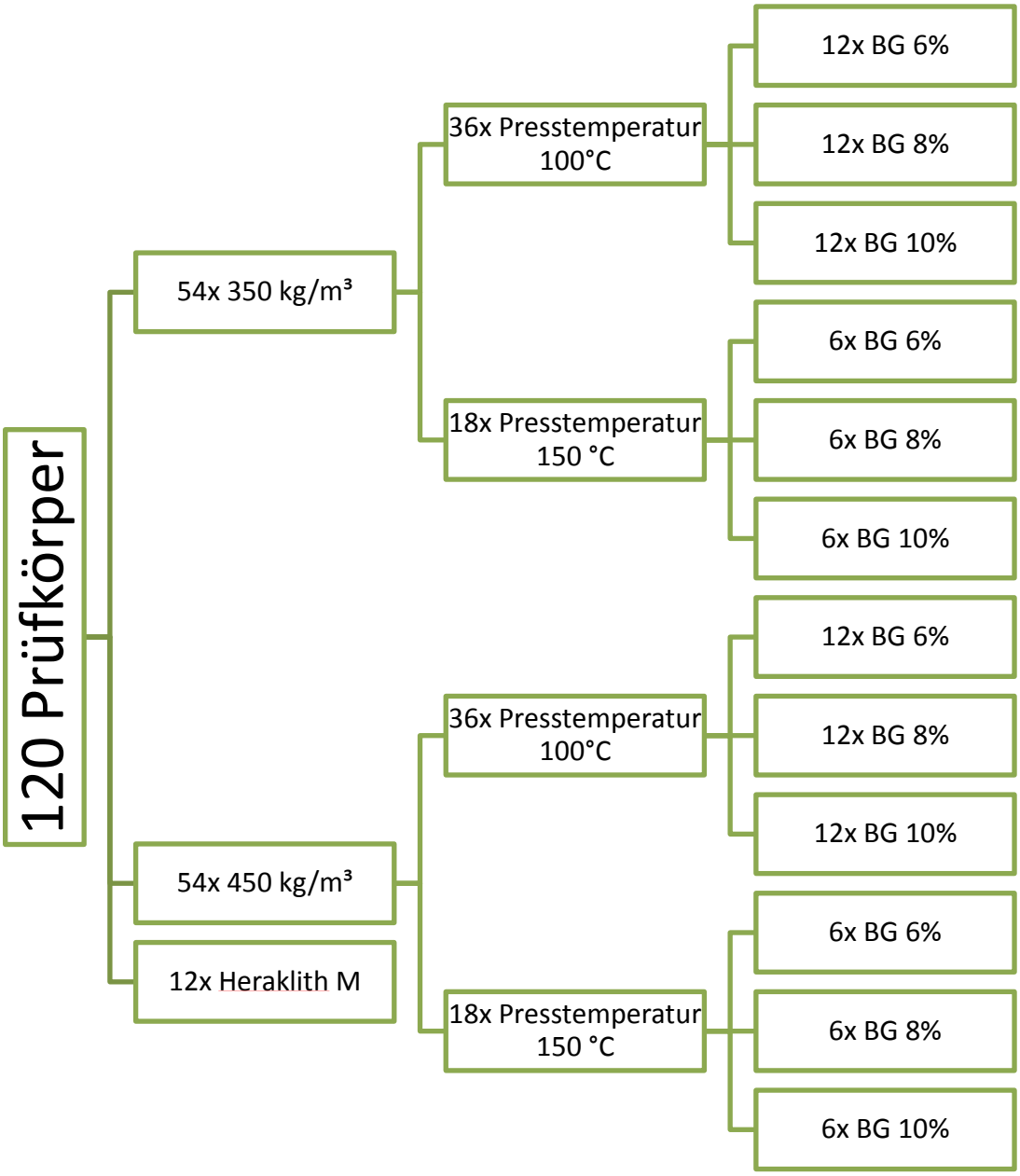

Abbildung 12: Versuchsplanung für die Herstellung der Trockenschnitzelplatten zur mechanischen Charakterisierung.

Abbildung 12 zeigt, dass Für die Presstemperatur von 150 °C weniger Proben hergestellt werden. Es wird im Zuge der Erstellung des Versuchsplans angenommen, dass die Presstemperatur keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Diese werden im folgenden Abschnitt „Ergebnisse“ näher erläutert. Zusätzlich wird jeweils eine Platte mit 8% Beleimgrad der beiden Zieldichten für den Einzelflammtest hergestellt. Die Ergebnisse aus der Biegeprüfung werden mit dem Programm SPSS statistisch ausgewertet.

4. Ergebnisse

4.1. Ausgangsmaterial

Zu Beginn wird die Ausgleichsfeuchte der angelieferten Zuckerrübenschnitzel ermittelt. Dazu werden drei Proben direkt aus dem Behältnis entnommen und auf Alu – Schälchen in der Analysewaage abgewogen. Die Alu – Schälchen mit den Zuckerrübenschnitzeln werden 7 Stunden in den Darrofen gelegt und im Anschluss wieder abgewogen. Der Feuchtegehalt von den angelieferten Trockenschnitzeln beträgt im Durchschnitt 12,2%.

Derselbe Versuch wird mit Trockenschnitzeln wiederholt, die über 14 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte lagern. Eine Ermittlung des Feuchtegehaltes ergibt eine durchschnittliche Feuchte von 15,4%. Die Berechnungen werden im Anhang angeführt.

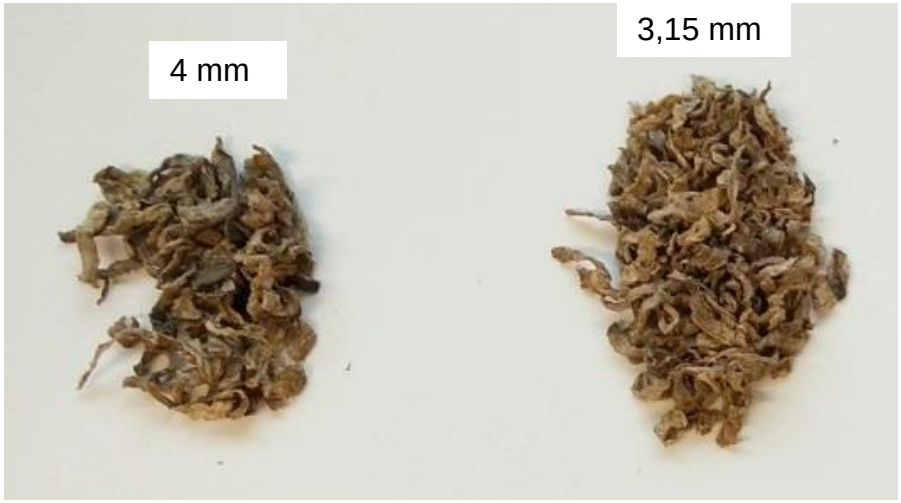

Abbildung 13: Charakteristische Form der Zuckerrübenschnitzel.

4.2. Siebanalyse

Da der Siebturm nur eine begrenzte Kapazität aufweist, wird die Gesamtmenge der Probe in sechs Einzelanalysen mit einem Gewicht von jeweils 40 g aufgeteilt.

Das in Abbildung 14 dargestellte Ergebnis der zusammengesetzten Siebanalyse zeigt, dass die Verteilung der Partikel kontinuierlich ansteigen und alle Fraktionen vollständig sind.

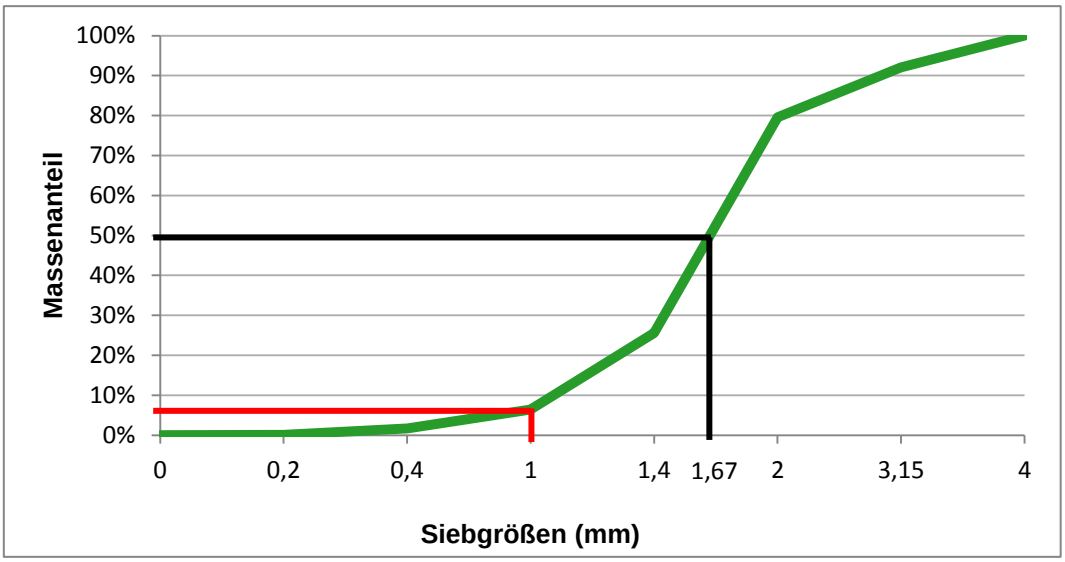

Abbildung 14: Siebkennlinie der Trockenschnitzel. „D50“ Wert in schwarz, „D6.45“ Wert in Rot dargestellt.

Die mittlere Partikelgröße „D50“ wird mit 1,67 mm bestimmt, wobei sich die Berechnung dazu im Anhang befindet. Der Wert D50 bedeutet, dass 50% aller Partikel in der Trockenschnitzelcharge eine Korngröße unter 1,67 mm aufweisen (Abbildung 14).

Durch die Entscheidung, dass ein Sieb mit der Maschenweite von 1mm verwendet wird, kann eine effiziente Produktion gewährleistet werden, da nur 6,45% der Gesamtmasse verloren gehen, was sowohl in Tabelle 1 als auch Abbildung 14 ersichtlich ist. Die Aufteilung der sechs einzelnen Fraktionen wird im Anhang dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnis der Siebanalyse.

Siebbezeichnung	Fraktion (mm)	Gesamtmasse der Fraktionen (g)	Prozentualer Massenanteil beruhend auf der Gesamtmasse aller Fraktionen in Spalte (I)	Kumulativer durchgehender Massenanteil (Summierung der Massen-anteile in % in Spalte K)
1.Sieb mit 4 mm	größer 4	18,8665	7,91%	100,00%
2.Sieb mit 3,15 mm	größer 3,15	29,8443	12,52%	92,09%
3.Sieb mit 2 mm	größer 2	128,6733	53,98%	79,57%
4.Sieb mit 1,4 mm	größer 1,4	45,6197	19,14%	25,59%
5.Sieb 1 mm	größer 1	11,2638	4,73%	6,45%
6.Sieb mit 0,4 mm	größer 0,4	3,8818	1,63%	1,72%
7.Sieb mit 0,2 mm	größer 0,2	0,1477	0,06%	0,09%
Sammelschale	< 0,2	0,0776	0,03%	0,03%
Summe		238,3747	100,00%	

4.3. Beleimen und verpressen

Während dem Beleimvorgang werden unterschiedliche Effekte in Bezug auf den Wasseranteil im UF Harz entdeckt.

Da die Trockenschnitzel vor der Beleimung einen Feuchtegehalt von ca. 12% aufweisen und im Normklima auf über 15% ansteigt, zeigen diese eine hohe Tendenz zur Wasseraufnahme.

Aus diesem Grund waren die ersten Versuche mit einem UF:H2O Verhältnis von 5:3,5 weniger erfolgreich, da zum einen die Beleimzeit mit der 2,2 mm Düse sehr lange dauert und zum anderen der geringe Wasseranteil im UF Harz sehr schnell von den Trockenschnitzeln aufgenommen wird, was in schlechter Kaltklebrigkeit resultiert.

4.3.1. Vorversuche

Platte mit einer Dicke von 55 mm:

Für den ersten Versuch eine Platte aus Trockenschnitzeln herzustellen, wird ein Einwiegekasten mit den Abmaßen von 25 x 25 x 15 cm verwendet. Die Zieldichte wird mit 400 kg/m³ und eine fertige Plattenhöhe von 55 mm angestrebt, wodurch sich für die Einwaage folgende Rechnungen ergeben:

Volumen der fertigen Platte:

$$25\ cm * 25\ cm * 5{,}5\ cm = 3437{,}5\ cm^3$$

Einwaage der Trockenschnitzel:

$$3437{,}5\ cm^3 * 0{,}4\ \frac{g}{cm^3} = 1375\ g$$

Der Feuchtegehalt der Trockenschnitzel wird mit 10% angenommen, da zu diesem Zeitpunkt der Feuchtegehalt noch nicht bestimmt worden ist.

Dadurch ergibt sich eine ATRO Masse der Zuckerrübenschnitzel von:

$$\frac{1375\ g}{1{,}1} = 1250\ g$$

Und somit eine Trockenmasse des UF Harz mit:

$$1250\ g * 0{,}1 = 125\ g$$

Daraus resultiert mit einem Mischverhältnis von 5 : 3,5 eine Wasserzugabe mit:

$$\frac{124\ g}{5} * 3{,}5 = 87{,}5\ g$$

Aufgrund von Verlusten wird beim ersten Versuch die doppelte Leimmenge abgemischt, also 250 g UF Leim mit einer Wasserzugabe von 175 g, was sich dann als etwas zu viel herausgestellt hat.

Während dem Besprühen des UF Harzes werden die Trockenschnitzel permanent mit der Hand umgewälzt um einerseits die sehr spröden Partikel so wenig wie möglich zu zerstören und zum anderen eine gleichmäßige Leimverteilung gewährleisten zu können.

Die beleimten Zuckerrübenschnitzel wirken mit einem Beleimgrad von 10% sehr trocken und weisen keine spürbare Kaltklebrigkeit auf, was auf die davor erwähnte hohe Wasserspeicherkapazität und dem geringen Wasseranteil im Harz zurückzuführen ist.

Vor dem Verpressen mit 100°C Presstemperatur wird der Rübenschnitzelkuchen händisch vorgepresst und im Anschluss mittels 55mm hohen Abstandhalter in die Presse gelegt und verpresst.

Da sowohl die obere, als auch die untere Platte mit 100°C vorgewärmt wird, errechnet sich die Presszeit bei einer Durchwärmzeit von 1 $\frac{mm}{min}$ mit:

$$\frac{55\ \text{mm}}{2} = 27{,}5\ \text{Minuten}$$

Das Ergebnis des ersten Versuches hat gezeigt, dass die Platte in der Randschicht eine gute Festigkeit aufweist, jedoch im Kernbereich (mittig) entweder keine Aushärtung stattgefunden hat, oder die Platte für den Probezweck zu früh „zerrissen“ worden ist. Auf das Thema Aushärtezeit wird in den Kapiteln Ergebnisse und Diskussion noch detaillierter eingegangen.

Platte mit einer Dicke von 20 mm:

Im zweiten Versuch wird eine dünnere Platte mit 20 mm Dicke und einer Zieldichte von 400 kg/m³ hergestellt, die folgenden Berechnungen werden, wenn nicht anders erwähnt, im Anhang angeführt. Die 20 mm Platte wird Probeweise mit 60°C und einer Pressdauer von 10 Minuten verpresst. Das Ergebnis sieht vielversprechend aus, ein Auftrennen der Zuckerrübenplatte ist nicht mehr so einfach wie beim ersten Versuch. Im Anschluss wird die Platte zersägt und die Dichte bestimmt, welche mit 413 kg/m³ sehr nahe an der Zieldichte ist.

Zementgebundene Platte aus Trockenschnitzel:

Da Heraklith® in dieser Arbeit als Referenz herangezogen wird, war die nächste Überlegung, eine Zementgebundene Zuckerrübenschnitzelplatte herzustellen. Dazu wird anfangs der selbe „Beleimgrad“ (10%) für die Zementplatte angenommen. Besprüht wird mit derselben Lackierpistole, wobei sich schon währenddessen gezeigt hat, dass der Zement abbindet bzw. das Wasser durch die Trockenschnitzel absorbiert wird. Der Rübenschnitzelkuchen wird dennoch unter die Presse bei 40°C gegeben, um das Ergebnis auswerten zu können.

Wie erwartet, bindet der Zement schon vor dem Pressen ab, bzw. kann nicht mehr abbinden, da das gesamte Wasser aufgesaugt wird. Die Platte weist praktisch keine Festigkeit auf. Im Zuge dieses Versuches wird die Sinnhaftigkeit einer Zementgebundenen Platte in Frage gestellt und vorerst verworfen.

Vorbereitung der Produktion:

Im nächsten Schritt werden größere Platten mit 500 x 300 x 25 mm hergestellt, um sehen zu können, wie diese sich verhalten. Zuerst werden Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ hergestellt, dafür werden 1312 g Trockenschnitzel und 119 g UF Pulver benötigt.

Bei dieser Zuckerrübenschnitzelplatte wird noch ein Mischverhältnis von 5 : 3,5 verwendet, wodurch sich die Beleimzeit trotz der Verwendung einer 2,5 mm Düse auf über eine Stunde beläuft. Die Presstemperatur wird anfangs mit 60°C angenommen und die Presszeit auf 12,5 Minuten, da die Platte 25 mm dick ist.

Aufgrund der langen Beleimzeit wird beim nächsten Herstellungsprozess bezogen auf den Trockengehalt 15% mehr Wasser hinzugefügt, womit sich das für die Einwaage erforderliche Wasser mit

$$\frac{119\ g}{5} * 3{,}5 * 1{,}15 = 95{,}79\ g$$

ergibt.

Die Beleimzeit von ca. 50 Minuten ist zwar eine Verbesserung, jedoch noch weit entfernt von einer optimalen Verarbeitungszeit, wodurch für die nächste Platte 20% mehr Wasser hinzugefügt wird. Der Beleimgrad bleibt mit 10% unverändert.

Bei der ersten Platte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ werden 1687 g Trockenschnitzel, 153 g UF Pulver und 128,5 g (+20%) Wasser benötigt, die Berechnungen dazu werden im Anhang erläutert. Da eine höhere Dichte mit mehr Material verbunden ist, steigt die Beleimzeit trotz 20% höheren Wasseranteil wieder auf über eine Stunde. Die Platte mit einer Dichte von 450 kg/m³ wird 12,5 Minuten mit einer Temperatur von 60°C verpresst.

Die Temperatur wird bis zu diesem Zeitpunkt testweise mit 60°C gewählt, primär um sogenannte „Dampfplatzer“ zu verhindern. Nach dem Pressen der schweren 450 kg/m³ Platte wird klar, dass auch bei höheren Presstemperaturen keine Delaminierung zu befürchten ist, da sowohl die Oberfläche, als auch die Kanten sehr Porös sind und somit der Wasserdampf ohne große Probleme entweichen kann (Abbildung 15a).

Aus dieser Erkenntnis werden ab sofort Platten mit 100°C Presstemperatur produziert und auch der Wasseranteil auf +30% aus zwei Gründen erhöht:

1. Kürzere Beleimzeit
2. Ausnützen des Quellverhaltens der Trockenschnitzel

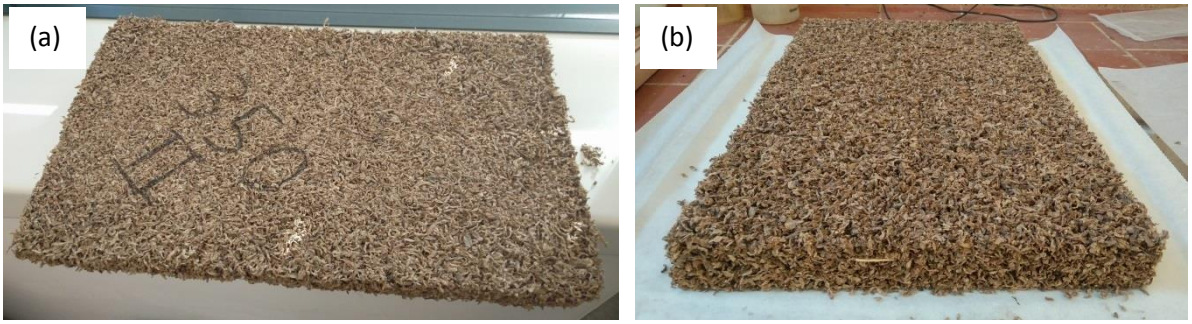

Abbildung 15: (a) Trockenschnitzelplatte mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und einer Presstemperatur von 60°C. Deutlich erkennbar, der poröse Randbereich.
(b) Rübenschnitzelkuchen mit guter Kaltklebrigkeit.

Durch eine kürzere Beleimzeit wird das UF-Harz schnell verarbeitet und es können mehrere Platten in kürzerer Zeit produziert werden. Das Besprühen der Trockenschnitzel mit dem UF-Harz und dem neuen Mischungsverhältnis von 5 : 4,55 gelingt nun in 20-30 Minuten.

Bedingt durch die hohe Wasseraufnahme der Trockenschnitzel ergibt sich das starke Quellverhalten. Dadurch ergeben sich mehrere positive Effekte sowohl für das Beleimen als auch für das Pressen im Anschluss. Beim Besprühen fällt auf, dass die Trockenschnitzel stark aufquellen und im gleichen Zug eine deutlich ausgeprägte Kaltklebrigkeit entwickeln, wie sie davor nicht erkennbar war. Dies wird in Abbildung 15b anhand des Rübenschnitzelkuchens deutlich, zusätzlich weist dieser ein höheres Volumen auf, wodurch im Zuge des Pressvorganges eine saubere Oberfläche entsteht.

4.3.2. Produktion

Die erste Platte, die mit 10% Beleimgrad, 100°C Presstemperatur und einem Mischverhältnis von 5 : 4,55 (UF : Wasser) hergestellt wird, hat eine Zieldichte von 450 kg/m³ und setzt sich wie folgt zusammen:

- 1687 g Trockenschnitzel
- 153 g UF Pulver
- 139 g Wasser

Die vollständigen Berechnungen sind im Anhang angeführt.

Nach dem Pressen und der Entnahme der Platte fällt auf, dass die Konsistenz dieser sehr weich und elastisch ist. Eine Abkühlung der Zuckerrübenplatten auf Umgebungstemperatur ist deshalb zwingend notwendig. Bei der Abkühlung ist darauf zu achten, dass die Luft an den Oberflächen gleichmäßig zirkulieren kann, um somit eine sogenannte Schüsselung (Abbildung 16a) zu vermeiden. Die Lagerung sollte daher stehend, wie z.B. in Abbildung 16b dargestellt, erfolgen.

Mit dieser Zusammensetzung (Zieldichte 450 kg/m³, 10% Beleimgrad, Presstemperatur 100°C) werden in Summe 12 Platten in den Abmaßen 500 x 300 x 25 mm hergestellt und im Anschluss im Klimaraum bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte gelagert.

Die Herstellung der restlichen Platten geschieht nach dem gleichen System, die genaue Aufteilung des Produktionsplans wurde bereits in Punkt 3.8 dargestellt und die Berechnungen werden im Anhang angeführt. In den folgenden Kapiteln werden

die Proben der Einfachheit halber abgekürzt. Die Zuckerrübenplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³, einer Presstemperatur von 100°C und einem Beleimgrad von 10% wird 450/100/10 genannt.

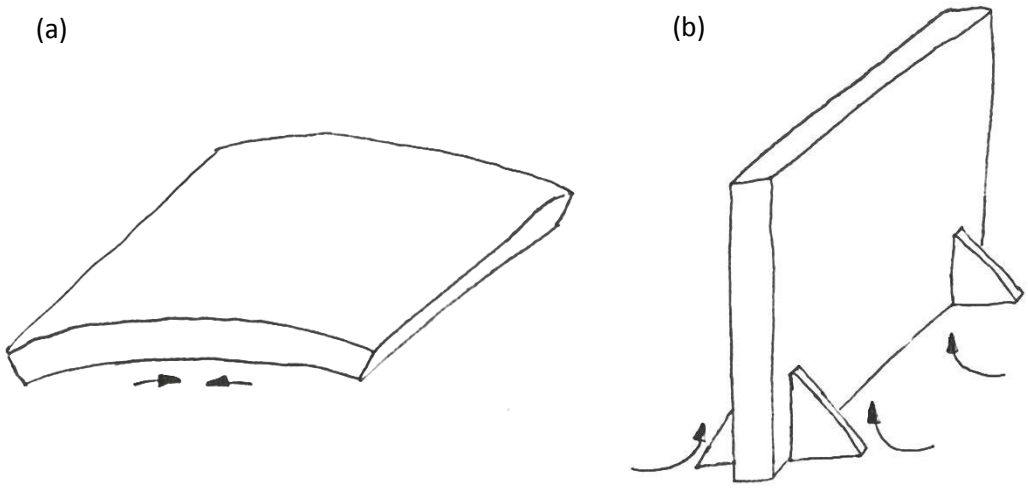

Abbildung 16: (a) Darstellung der Schüsselung einer Platte und die wirkenden Schwindkräfte. (b) Maßnahme zur gleichmäßigen Belüftung um eine Schüsselung der Platte vermeiden zu können.

4.3.2.1. Besondere Vorkommnisse bei der Produktion:

Bei sämtlichen Platten mit 150°C Presstemperatur werden nach dem Pressen weiße Ablagerungen an der Oberfläche deutlich sichtbar, wie man in Abbildung 17 erkennen kann.

Abbildung 17: Weiße Ablagerungen an der Oberfläche der Zuckerrübenschnitzelplatte mit der Zieldichte 450 kg/m³, 150°C Presstemperatur und 8% Beleimgrad

Nach dem Pressen der Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³, 6% Beleimgrad und einer Presstemperatur von sowohl 100°C als auch 150°C sind diese sehr weich und instabil, was jedoch nach dem Abkühlen überhaupt nicht mehr der Fall ist. Generell kann für alle produzierten Platten gesagt werden, dass erst im Zuge des Abkühlens die volle Festigkeit ausgebildet wird.

Bei allen Platten mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ und 350 kg/m³ kann nach dem Pressen eine unterschiedliche Beschaffenheit der Ober- und Unterseite in Bezug auf die Position in der Presse erkannt werden. Die Oberseite ist tendenziell poröser, wobei die Unterseite glatter wirkt (Abbildung 18). Wenn von der Ober- bzw. Unterseite der Platten gesprochen wird, bezieht es sich immer auf die Produktionsseite.

Abbildung 18: (a) Oberseite und (b) Unterseite der 350 kg/m³ dichten Platten

Es werden testweise Platten mit einer geringeren Zieldichte von 250 kg/m³ und einem Beleimgrad von 10% hergestellt. Die Platten weisen bei der Beleimung eine gute Kaltklebrigkeit auf, doch nach dem Abheben des Einwiegekastens stellt sich heraus, dass der Überstand des Rübenschnitzelkuchens nur wenige mm über den Distanzen beträgt. Diese Situation ist problematisch, da die Presse nur sehr wenig Pressdruck auf die Platte auswirken und die Verklebung dadurch nur begrenzt stattfinden kann. Eine weitere Produktion dieser leichten Platten wird deshalb auch verworfen.

Im Gegensatz zu den Platten mit der geringen Dichte wird im Zuge eines Versuches der Pressdruck auf 4 MPa ohne Distanzen erhöht (bezogen auf eine Fläche von 500

x 500 mm), wobei die hergestellte Platte das Standardmaß von 500 x 300 mm aufweist. Dafür werden 1312 g Trockenschnitzel verwendet, der Beleimgrad beträgt 10% und die Presstemperatur wird auf 80°C reduziert, um einer inneren Delaminierung entgegenzuwirken. Die Presszeit wird mit 15 Minuten vergleichsweise lang angenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Hochdichte Zuckerrübenschnitzelplatte mit 10% Beleimgrad.

Der Versuch, eine zweite hochdichte Platte herzustellen, die auch 1312 g Trockenschnitzel beinhaltet, jedoch nur 5% Beleimgrad,150°C Presstemperatur mit Rückkühlung auf 80°C und 10 Minuten Presszeit, gelingt leider nicht. Während dem Pressen mit 4 MPa „zerfließt“ die Platte und es entstehen am gesamten Körper kleine Bläschen, die wie partielle Delaminierungen aussehen.

4.4. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest

Laut Norm sollen während dem Einzelflammtest folgende Fragen beantwortet werden:

- Tritt eine Entzündung auf?
- Überschreitet die Flammenspitze eine Höhe von 150 mm oberhalb des Beflammungspunktes und zu welchem Zeitpunkt geschieht dies?
- Ist brennendes Abtropfen vorhanden, das zur Entzündung des Filterpapiers führt?
- Sonstige Beobachtungen zum Verhalten der Probe.

Im Zuge des Einzelflammtestes werden zuerst alle Versuche mit einer Prüfdauer von 30 Sekunden durchgeführt, wobei die zu prüfenden Platten aus Zuckerrübenschnitzel

mit der Zieldichte von 350 kg/m³ als auch 450 kg/m³ einen Beleimgrad von 8% aufweisen und mit einer Temperatur von 100°C gepresst worden sind.

Während dem Prüfvorgang stellt sich heraus, dass weder die hergestellten Platten, noch das darunter liegende Papier durch herabfallende Teile zur Entzündung neigen, wie in Tabelle 2 dargestellt ist.

Bei den Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ fallen vereinzelt Aschereste auf das Kopierpapier, welche dieses jedoch nicht entzünden. Zwei Beispiele davon sind in Abbildung 20 gezeigt. Es konnte beobachtet werden, dass sich die Brandrückstände ausschließlich auf der unteren Produktionsseite gelöst haben.

Tabelle 2: Ergebnisse des Einzelflammtests nach 30 Sekunden.

Parameter	Typ	Benennung	Ergebnis 350 kg/m³	Ergebnis 450 kg/m³	Ergebnis Heraklith
Auftreten einer Entzündung	ja/nein	-	**nein**	**nein**	**nein**
Flamme erreicht 150 mm	ja/nein	-	**nein**	**nein**	**nein**
Dauer zum Erreichen von 150 mm	Variable	t150	**-**	**-**	**-**
Entzündung des Filterpapiers	ja/nein	-	**nein**	**nein**	**nein**

Abbildung 20: Abfallende Brandrückstände von der Unterseite einer 350 kg/m³ Platte. Man erkennt eine leichte Verfärbung des Papiers durch Hitzeeinwirkung.

Es werden folgende sonstige Beobachtungen an den 12 geprüften Proben während dem Einzelflammtest festgestellt:

- Bei der 350 kg/m³ Platte findet nach dem Flammkontakt und während dem Prüfvorgang keine Rauchentwicklung statt. Nach der Prüfdauer von 30 s ist eine leichte Rauchentwicklung erkennbar, die nach ca. einer Sekunde verschwindet. Die Probekörper weisen im Bereich der Flammeinwirkung einen schwarzen, verrußten Fleck auf. Die Höhe der Rußflecken, gemessen vom Flammberührungspunkt, beträgt im Mittelwert 43,5 mm.

- Während des gesamten Prüfvorgangs der 450 kg/m³ Platte kann keine Rauchentwicklung festgestellt werden, nach dem Prüfvorgang minimale Rauchentwicklung, die nach ca. einer Sekunde verschwindet. Die Fläche des verrußten Bereiches der Flammeinwirkung ist im Vergleich zu der niedriger dichten Platte etwas kleiner, wobei die Höhe der Rußflecken gemessen vom Flammberührungspunkt im Mittelwert 37,5 mm beträgt.

- Die Heraklith® - Platte erzeugt kurz nach dem Kontakt der Flamme einen deutlich sichtbaren Rauchfaden, der ca. eine Sekunde andauert. Während des gesamten Tests glüht die Holzwolle auf, ohne sich zu entzünden. Nach wegziehen der Flamme glüht es ca. eine Sekunde nach und es ist ein kaum sichtbarer Rauchfaden zu erkennen. Es fallen vereinzelt ausgebrannte Aschepartikel auf das Filterpapier, die jedoch nicht zum Entzünden führen. Die Höhe der Rußflecken, gemessen vom Flammberührungspunkt beträgt im Mittelwert 25,1 mm. Zudem ist eine starke Geruchsentwicklung bemerkbar.

In Abbildung 21 ist ein repräsentativer Auszug der Ergebnisse gegenübergestellt, wobei sämtliche Einzelergebnisse im Anhang angeführt werden. Die Höhe der Rußflecken sind nicht mittels Computersoftware ausgewertet worden, weshalb die Ergebnisse nur als grobe Vergleichswerte zu sehen sind.

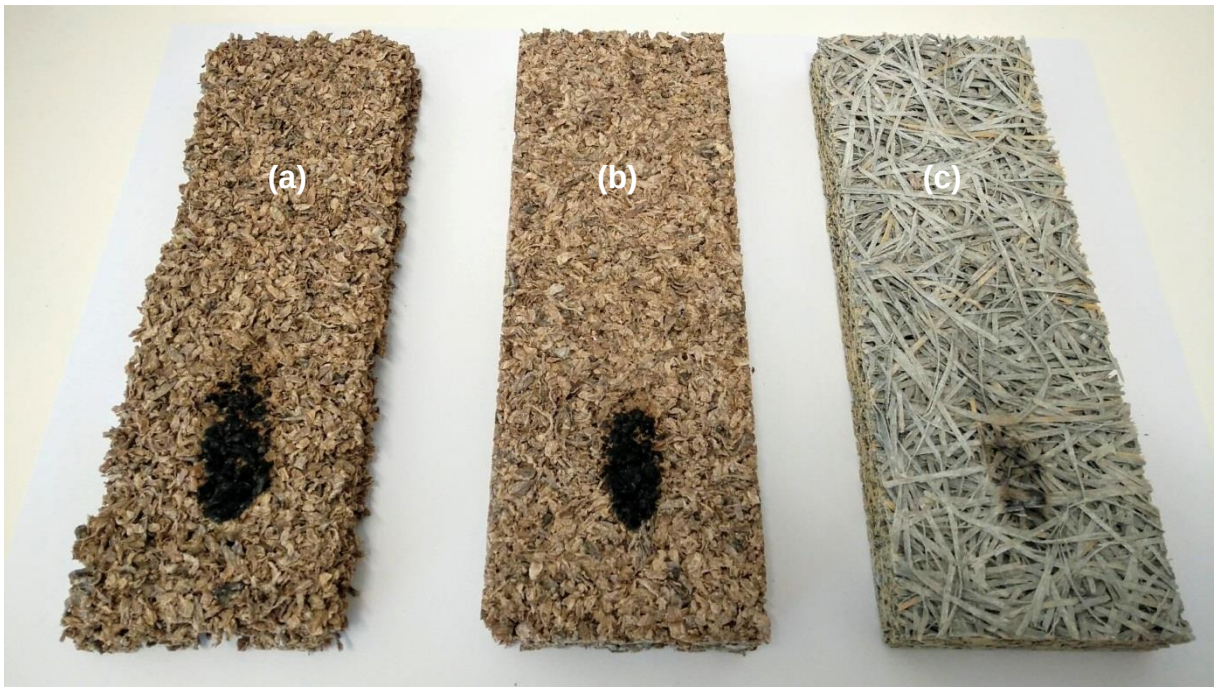

Abbildung 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Einzelflammtests nach ISO/DIS 11925-2:2018. (a) 350 kg/m³ (b) 450 kg/m³ und (c) Heraklith® als Referenzprobe

Da die maximale Dauer des Einzelflammtestes laut Norm nur 30 Sekunden beträgt, wird der Versuch im Zuge der Arbeit auf 10 Minuten verlängert. Der Ablauf ist an die Norm angelehnt und unterscheidet sich nur durch die Prüfdauer.

Der 10 – minütige Flammtest bringt keine neuen Erkenntnisse. Bei der 350 kg/m³ Platte lösen sich nach 9:48 Minuten zwei kleine Ascheteile, die jedoch schon abgekühlt sind und somit das Papier weder entzünden, noch verfärben (Abbildung 23). Die Fläche des Rußfleckes ist deutlich größer geworden (Abbildung 22) und es bildet sich sichtbare Asche aus. Es kann kein Einbrand ins Material festgestellt werden, sondern eher ein verkohlter Materialauftrag.

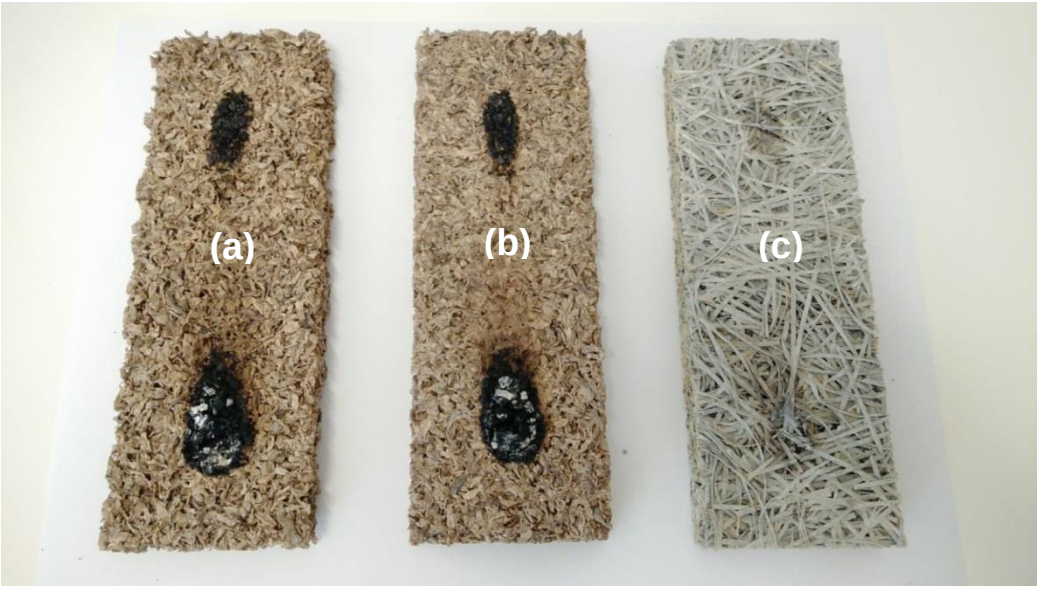

Abbildung 22: Repräsentative Ergebnisse des verlängerten Einzelflammtests. (a) 350 kg/m³, (b) 450 kg/m³ und (c) Heraklith® als Referenzprobe.

Während dem ausgedehnten Test der Zuckerrübenschnitzelplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ fallen keine Fragmente auf das darunter liegende Papier. Die verrußte Fläche ist erkennbar größer als im 30 sekündigen Test, jedoch kleiner als bei der 350 kg/m³ Probe.

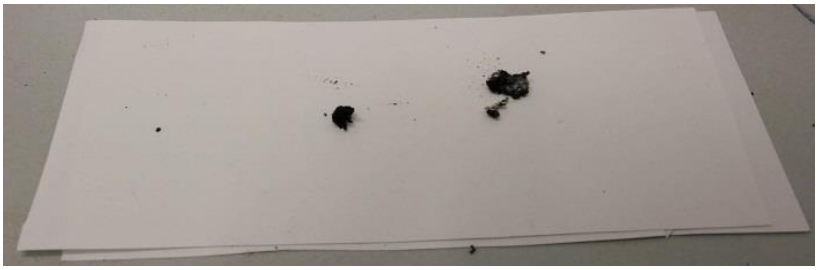

Abbildung 23: Losgelöste Ascherückstände während dem 10 minütigen Einzelflammtests bei der 350 kg/m³ Platte.

Die Heraklith® Referenzprobe weist dasselbe Verhalten wie im Test laut Norm auf, außer dass keine Ascheteile auf das Papier fallen. Nach den 10 Minuten wird ein ca. 2-3 mm tiefer Einbrand durch die Flammeinwirkung erkennbar.

4.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Im ersten Versuch wird eine Zuckerrübenplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ ohne das Einwickeln mit der Schutzfolie getestet.

Es werden drei Plattenmittententemperaturen mit einer Temperaturdifferenz von 10°C geprüft: T_{Kern}= 10°C, 25°C und 45°C. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt, es kann ein klar steigender Zusammenhang zwischen Messtemperatur und Wärmeleitfähigkeit erkannt werden.

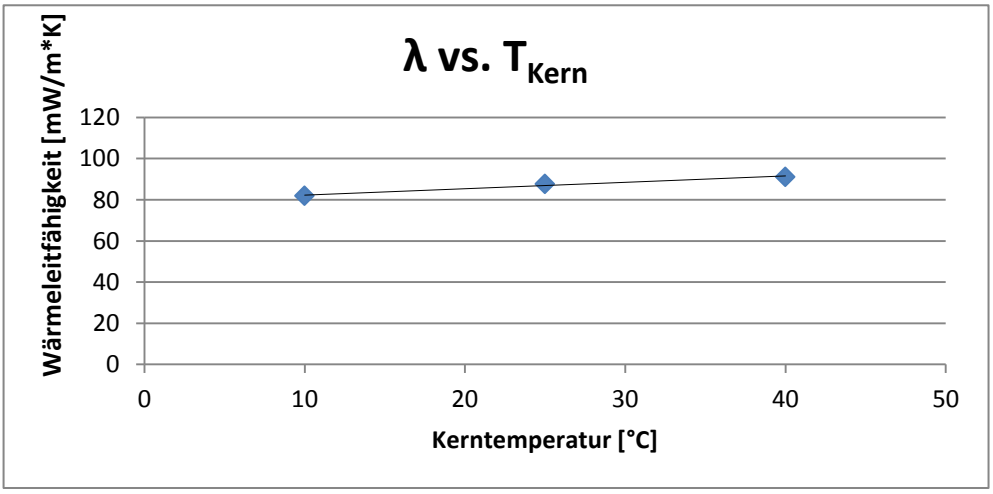

Abbildung 24: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Kerntemperatur von einer Zuckerrübenplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³, einem Beleimgrad von 8% und der Presstemperatur von 150°C.

Die folgenden Versuche werden mit der dünnen Schutzfolie bei einer T_{Kern} von 10°C und einer Plattendifferenztemperatur von 15°C durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt und sollen einen groben Überblick über die Wärmeleitfähigkeit der Zuckerrübenschnitzelplatten geben. Wie erwartet, haben die weniger dichten Platten eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als die höher dichten Platten. Die im ersten Versuch geprüfte Platte wird nach 7 tägiger Lagerung im Klimaraum erneut mit umgebender Schutzfolie geprüft, wodurch eine minimal niedrigere Wärmeleitfähigkeit feststellbar ist (ohne Folie: 0,82 W/mK, mit Folie 0,81 W/mK). Die detaillierten Messergebnisse sind im Anhang dargestellt.

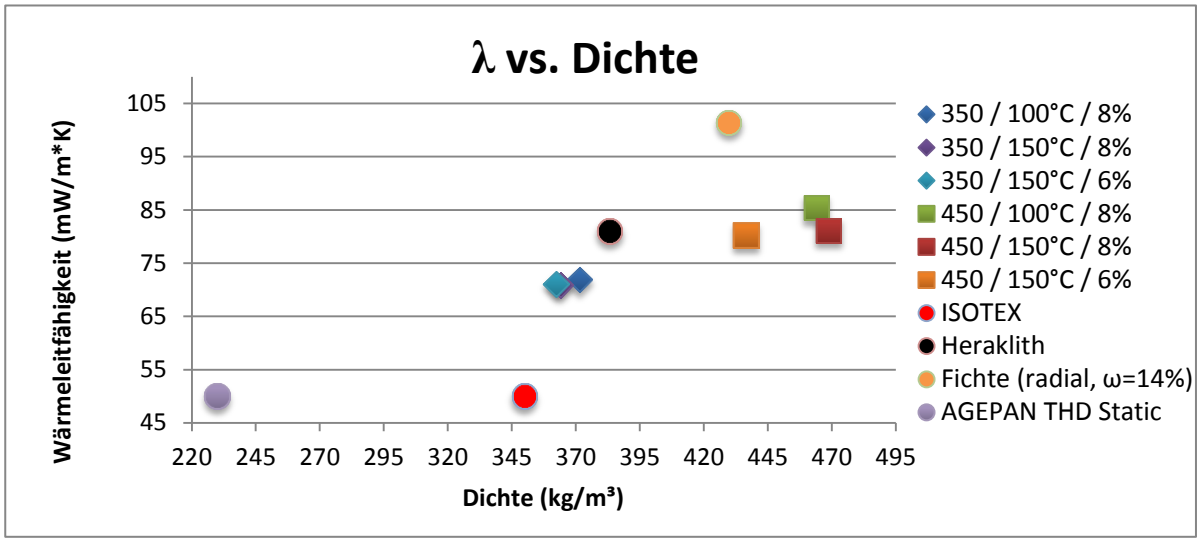

Abbildung 25: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zur Dichte mit Schutzfolie und Vergleichsmaterialien. (T_{Kern} = 10°C, ΔT = 15°C bei den ZRS Platten)

4.6. Drei-Punkt Biegeversuch

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf den in Kapitel 3.8 gezeigten Versuchsplan. In Abbildung 26 sind die repräsentativen Spannungs-Dehnungskurven der Zuckerrübenschnitzelplatten mit der Zieldichte von 350 kg/m³, 450 kg/m³ und der Heraklith® Platte als Referenz dargestellt. Die Maximalwerte in Abbildung 26 sind arithmetisch gemittelt und bilden daher nicht den Medianwert ab.

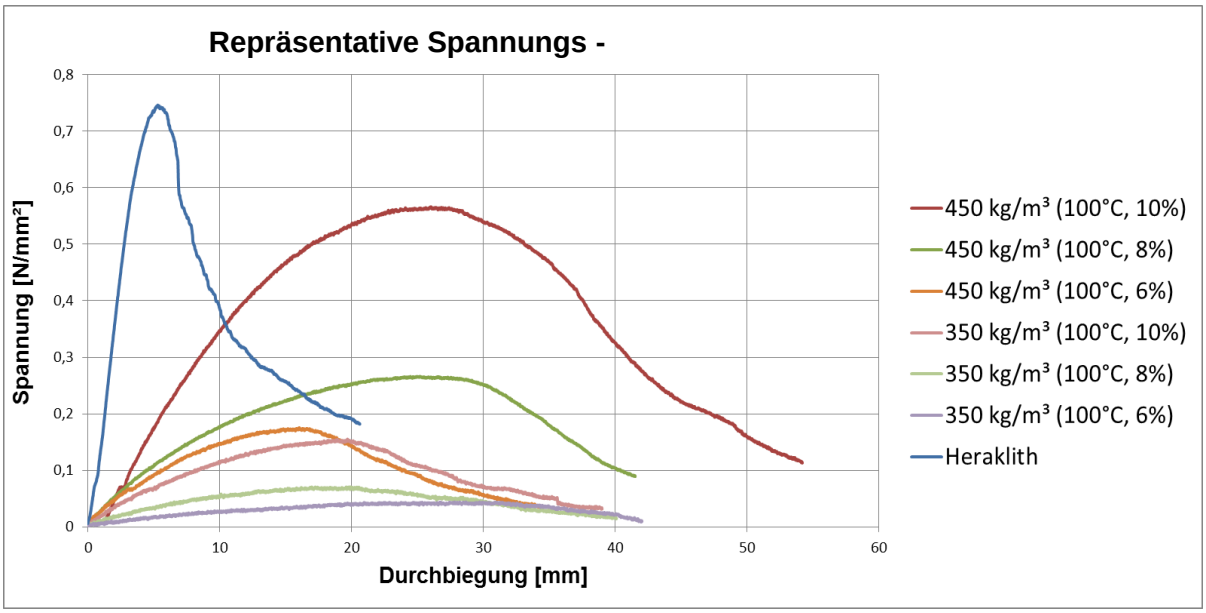

Abbildung 26: Repräsentative Spannungs - Durchbiegungskurven aus dem 3-Punkt Biegeversuch. Es sind nur Ergebnisse der Platten mit 100°C Presstemperatur sowie der Heraklith® - Platte als Referenz angeführt.

Während der Biegeprüfung stellt sich heraus, dass es teilweise deutliche Festigkeitsunterschiede zwischen der Ober- und Unterseite der Platten gibt. Um bei der Biegeprüfung keine Extremwerte zu erhalten, sondern ein homogeneres Ergebnis, werden 50% der Prüfkörper mit der Plattenoberseite nach oben und 50% mit der Plattenunterseite nach oben geprüft.

Die höchsten Biegefestigkeiten der hergestellten Zuckerrübenplatten weisen die Proben mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ und einem Beleimgrad von 10%, sowohl mit einer Presstemperatur von 100°C, als auch 150°C auf. Aus dem Diagramm kann für beide hergestellten Zieldichten eine deutlich sinkende Biegefestigkeit mit sinkendem Beleimgrad herausgelesen werden, wobei selbst die 450/100/6 Platte eine höhere Biegefestigkeit als die 350/100/10 Platte aufweist. Die mittlere Biegefestigkeit der Heraklith® Probe ist um ca. 23% höher als die der Zuckerrübenplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ und einem Beleimgrad von 10%.

Der mittlere E-Modul aller Heraklith® Proben ist mit knapp 240 N/mm² deutlich höher als jener der steifsten Zuckerrübenplatten, welche mit ca. 48 N/mm² nur 20% des E-Moduls der Heraklith® Proben erreichen. Zur besseren Vergleichbarkeit wird die Biegefestigkeit dem E-Modul der Probekörper in Abbildung 27 gegenübergestellt.

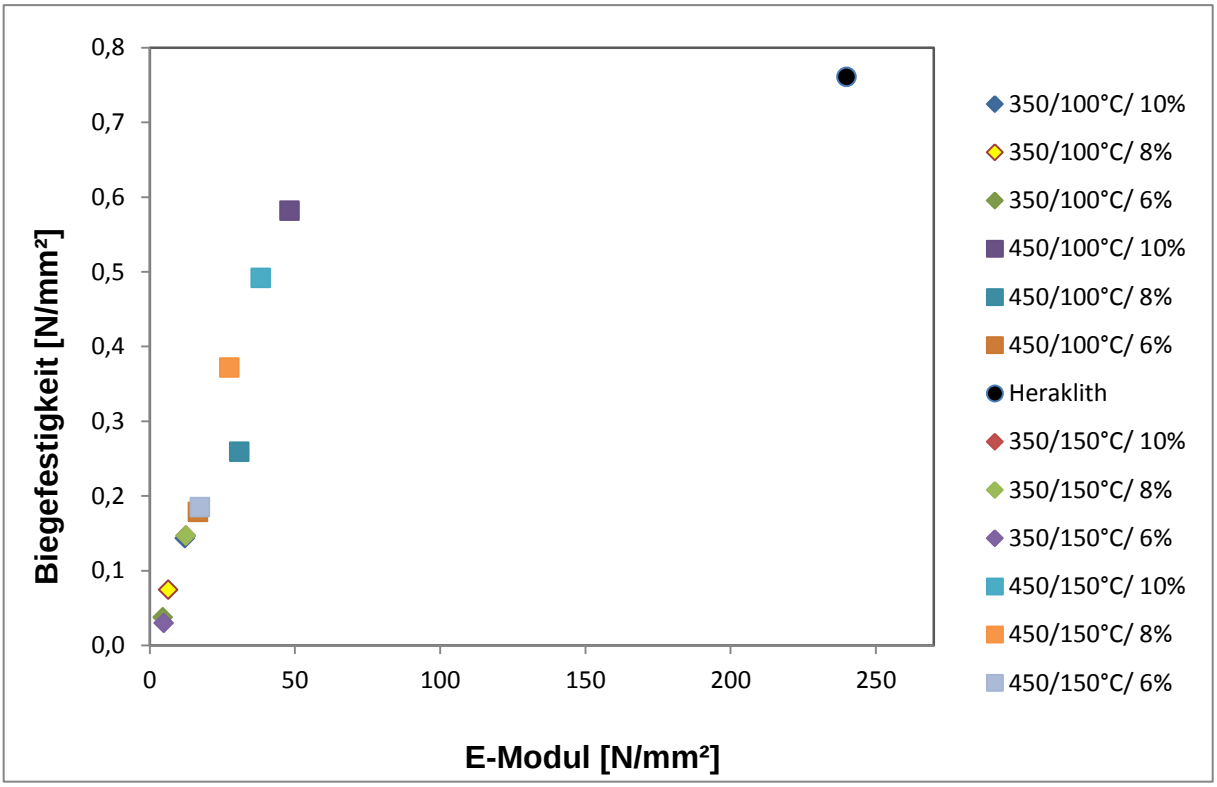

Abbildung 27: Gegenüberstellung des E-Moduls (oben) und der Biegefestigkeit (unten) der Prüfkörper.

4.7. Statistische Darstellung der Biegeprüfungsergebnisse

4.7.1. Box Plots der ermittelten Biegefestigkeiten

Die Übersicht der statistischen Auswertungen mit SPSS ist in Abbildung 28 mittels Box Plots dargestellt, wobei hier ersichtlich wird, dass sich die Heraklith® Referenzprobe von den 450/100/10 Zuckerrübenplatten im Gegensatz zum arithmetischen Mittel weniger stark unterscheidet, was durch eine einfaktorielle Varianzanalyse auch bestätigt wird. Bei den Proben mit 150°C Presstemperatur gibt es mehrere (zwei extreme und einen milden) Ausreißer, bei der Heraklith® Probe nur einen milden Ausreißer.

Die höchsten Biegefestigkeitswerte werden für alle Zieldichten und Presstemperaturen durch die Platten mit 10% Beleimgrad erzielt. Die Streuung der 450 kg/m³ Platten ist deutlich größer als die der 350 kg/m³ Zuckerrübenschnitzelplatten.

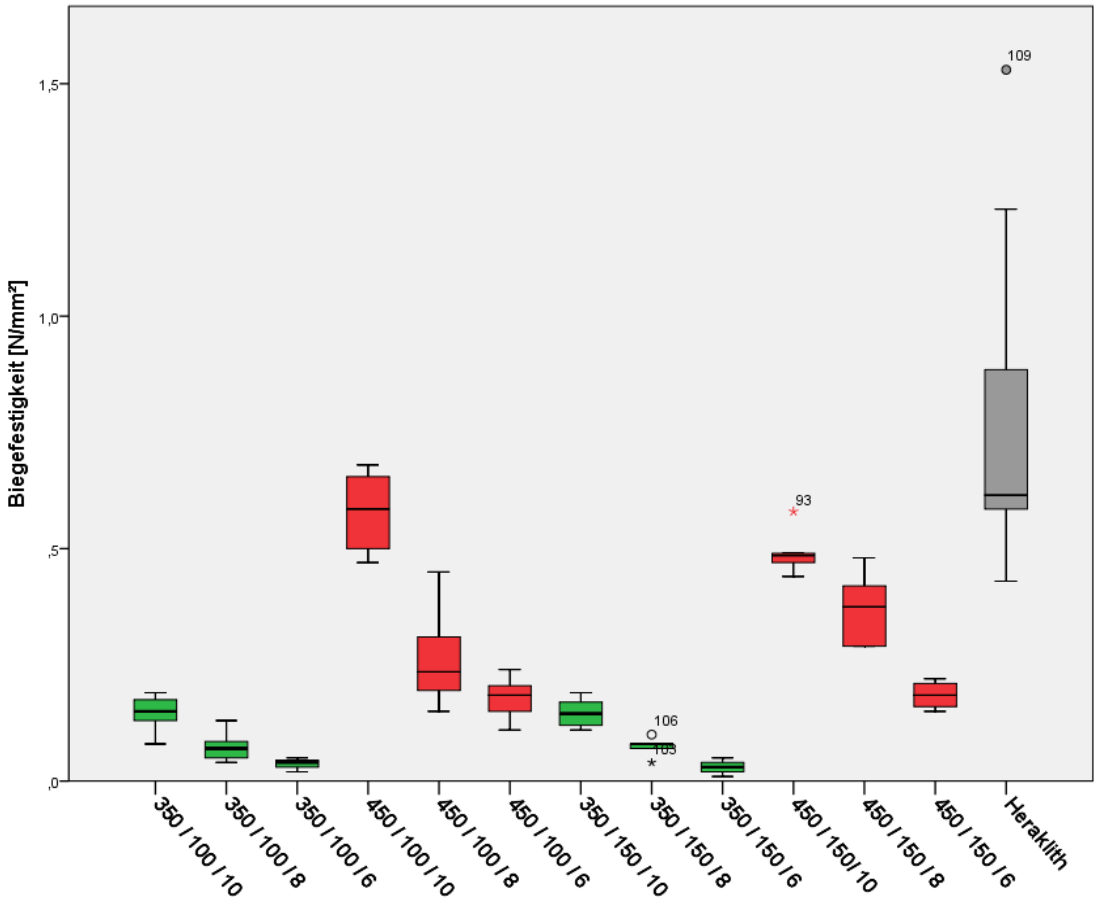

Abbildung 28: Box Plots aller Biegefestigkeiten der getesteten Proben im direkten Vergleich. Starke Ausreißer* werden mit einem Stern gekennzeichnet, milde Ausreißer mit einem Kreis.**

*** Abstand vom ersten oder dritten Quartil: > 3 * IQA.**
**** Abstand vom ersten oder dritten Quartil: zwischen 1,5 * IQA und 3 * IQA**

Neben der Darstellung in Abbildung 28 werden für die einzelnen Probekörper der Mittelwert, Median, Modus, die Standardabweichung, das Minimum und Maximum bestimmt (Tabelle 3). Es wird hier nur die Auswertung für die Proben mit 100°C Presstemperatur dargestellt, da diese eine höhere statistische Aussagekraft haben (n = 12). Wie in Tabelle 3 ersichtlich, sind alle Proben gültig.

Tabelle 3: Mittelwert, Median, Modus, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Biegefestigkeiten aller 450 und 350 kg/m³ Proben mit 100°C Presstemperatur.

450/100/10		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,5817
Median		0,5850
Modus		,50[a]
Standardabweichung		0,07826
Minimum		0,47
Maximum		0,68

450/100/8		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,2592
Median		0,2350
Modus		0,20
Standardabweichung		0,09653
Minimum		0,15
Maximum		0,45

450/100/6		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,1783
Median		0,1850
Modus		0,20
Standardabweichung		0,03996
Minimum		0,11
Maximum		0,24

350/100/10		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,1458
Median		0,1500
Modus		,13[a]
Standardabweichung		0,03476
Minimum		0,08
Maximum		0,19

350/100/8		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0742
Median		0,0700
Modus		,05[a]
Standardabweichung		0,02644
Minimum		0,04
Maximum		0,13

350/100/6		
Biegefestigkeit		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0375
Median		0,0400
Modus		0,04
Standardabweichung		0,01055
Minimum		0,02
Maximum		0,05

a) Mehrere Modi vorhanden. Der kleinste Wert wird

4.7.2. Biege-Elastizitätsmodul

Die Biege-Elastizitätsmodule der Zuckerrübenschnitzelplatten sind im Vergleich zur Heraklith® - Platte deutlich geringer, wie man in Abbildung 29 erkennen kann. Die höchsten Elastizitätsmodul - Werte werden wie auch bei der Biegefestigkeit von den 450/100/10 bzw. 450/150/10 Platten erreicht.

Die geringsten E-Modul Werte werden von den Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und einem Beleimgrad von 6% erreicht.

In Tabelle 4 ist der Mittelwert, Median, Modus und die Standardabweichung, sowie das Minimum und das Maximum dargestellt. Wie schon in Abbildung 27 ersichtlich war, sind die Biege – Elastizitätmodule bei allen Platten sehr gering. Bei der 350/100/6 Probe fehlt ein Wert, da dieser bei einem Prüfkörper nicht bestimmbar gering war.

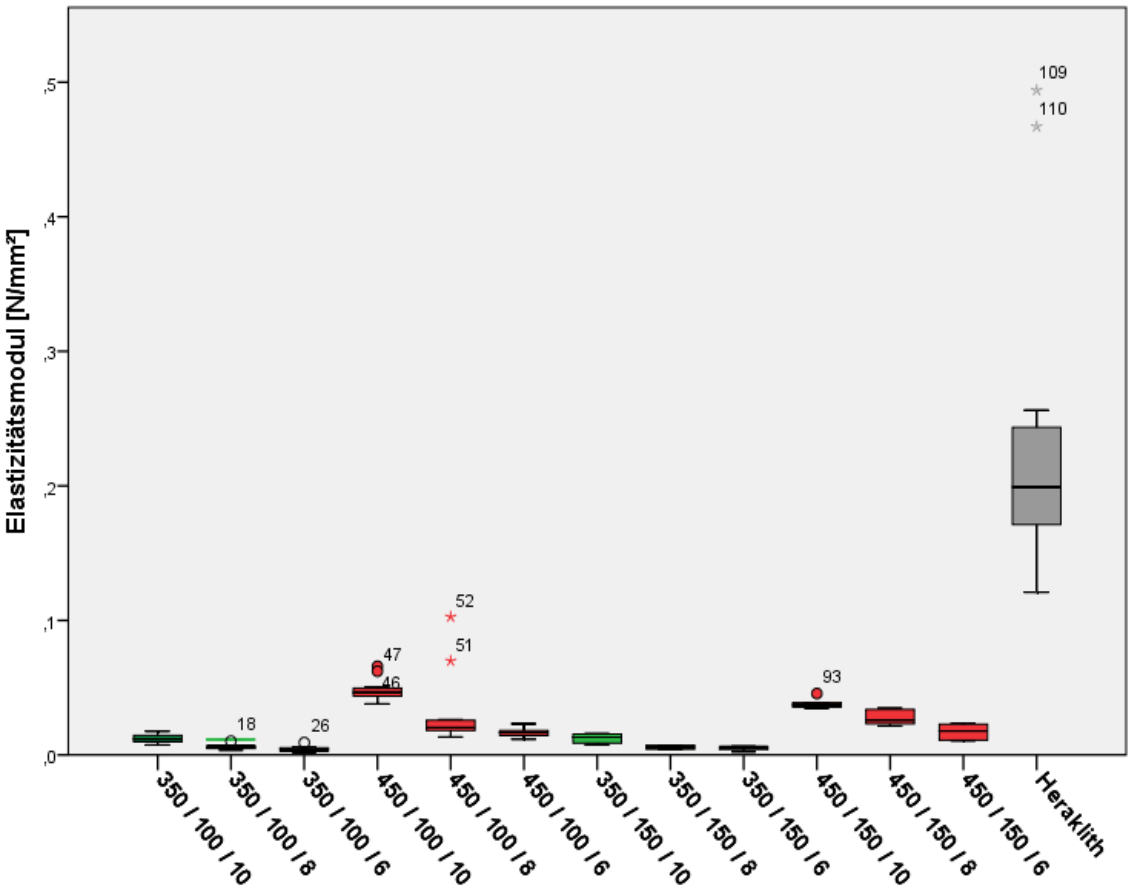

Abbildung 29: Box Plots aller Biege E-Module der getesteten Proben im direkten Vergleich. Starke Ausreißer* werden mit einem Stern gekennzeichnet, milde Ausreißer mit einem Kreis.**

*** Abstand vom ersten oder dritten Quartil: > 3 * IQA.**
**** Abstand vom ersten oder dritten Quartil: zwischen 1,5 * IQA und 3 * IQA**

Tabelle 4: Statistische Auswertungen der Biegeelastizitätmodule aller 450 und 350 kg/m³ Proben mit 100°C Presstemperatur.

450/100/10		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0482
Median		0,0465
Modus		,04[a]
Standardabweichung		0,00835
Minimum		0,04
Maximum		0,07

450/100/8		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0309
Median		0,0204
Modus		,01[a]
Standardabweichung		0,02702
Minimum		0,01
Maximum		0,10

450/100/6		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0166
Median		0,0165
Modus		,01[a]
Standardabweichung		0,00298
Minimum		0,01
Maximum		0,02

350/100/10		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0121
Median		0,0118
Modus		,01[a]
Standardabweichung		0,00304
Minimum		0,01
Maximum		0,02

350/100/8		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	12
	Fehlend	0
Mittelwert		0,0064
Median		0,0063
Modus		,00[a]
Standardabweichung		0,00241
Minimum		0,00
Maximum		0,01

350/100/6		
Elastizitätsmodul		
N	Gültig	11
	Fehlend	1
Mittelwert		0,0045
Median		0,0036
Modus		,00[a]
Standardabweichung		0,00198
Minimum		0,00
Maximum		0,01

a) Mehrere Modi vorhanden. Der kleinste Wert wird angezeigt.

5. Diskussion

5.1. Ausgangsmaterial

Bei den Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Zuckerrübenschnitzel im Normklima einen um 3,2% höheren Feuchtegehalt aufweisen, als bei der Anlieferung.

Diese Erkenntnis deckt sich auch mit der Aussage, dass sowohl feine, als auch grobe Zuckerrübenschnitzelpartikel eine hohe Wasseradsorption und Wasserspeicherkapazität aufweisen (Hemmingsen, et al. 2008, Serena und Bach Knudsen 2007).

Die charakteristisch länglich – gekringelte Form der Zuckerrübenschnitzel kann vor allem an den gröberen Fraktionen (über 3,15 mm und 4 mm) erkannt werden. Die „spezifisch längliche Form“ lässt sich auf das Messerdesign des Rübenhecksklers zurückführen (Karaky, et al. 2019).

5.2. Siebanalyse

Bei der Siebanalyse kann festgestellt werden, dass sich fast 75 % der gesamten Masse über dem 3. Sieb (2 mm) befindet. Die Erkenntnis deckt sich auch mit Werten aus der Literatur, wo beschrieben wird, dass sich die größte Fraktion zwischen 2 mm und 4 mm mit 62% aller Zuckerrübenschnitzeln wiederfindet (Karaky, et al. 2019). Die Abweichung (75% zu 62%) erklärt sich damit, dass im Zuge der Masterarbeit die Maschenweite des größten Siebes nur 4 mm beträgt, in der Vergleichsstudie jedoch 8 mm.

5.3. Beleimen und verpressen

Wie in Punkt 0 bereits erwähnt, stellt sich während des Beleimvorgangs heraus, dass sich eine Zugabe von Wasser sehr positiv auswirkt.

Die hohe Wasserspeicherkapazität lässt sich auf den hohen Pektingehalt der Zuckerrübenschnitzel zurückführen (Serena und Bach Knudsen 2007). Eng damit verbunden ist auch das starke Quellverhalten (Ramanzin, Bailoni und Bittante 1994), und somit auch die Erhöhung des Volumens, wodurch die beleimten Zuckerrübenschnitzel stärker komprimiert werden können und eine (optisch) bessere Platte erzeugt wird.

Die Anfangs gewählte Presstemperatur von 60°C wurde gewählt, um sog. „Dampfplatzer“ zu vermeiden, wie schon in Punkt 0 erwähnt. Der Gasdruck innerhalb der Matte steigt durch verdampfendes Wasser an, wodurch hohe Kräfte innerhalb der Matte entstehen, die bis zur Delaminierung (sog. Dampfplatzer) führen können. Diese Dampfplatzer treten meistens bei hohen Oberflächendichten auf. (Meyer und Thoemen 2007, 50).

Durch den höheren Wassergehalt der beleimten Zuckerrübenschnitzel wird die Presstemperatur schneller und effektiver in den Kern übertragen, wodurch die Aushärtung im Kern zusätzlich begünstigt wird.

Sobald der Kontakt mit den heißen Pressplatten gegeben ist, entsteht an den äußersten Fasern Wasserdampf, welcher die Feuchtigkeit in das Innere des Kerns bringt und dadurch den Dampfdruck steigen lässt (Cai, Muehl und Winandy 2006).

5.3.1. Besondere Vorkommnisse bei der Produktion

Die mit 150°C verpressten Platten weisen oberflächlich einen weißen Schleier auf. Es konnte kein eindeutiger Grund für dieses Verhalten herausgefunden werden, jedoch wird vermutet, dass es mit der Degradierung von Harnstoff zusammenhängen könnte, welche bei 132°C stattfindet (Popović, et al. 2011).

Das Aushärteverhalten der Zuckerrübenplatten ist ähnlich den Spanplatten. Nach dem Pressen haben die Platten eine ausreichende Formstabilität, müssen jedoch noch abgekühlt werden, um die endgültige Festigkeit zu erreichen (Wimmer 2017).

Die Oberflächenbeschaffenheit nach dem Pressen unterscheidet sich an der Ober- und Unterseite relativ stark. Zum einen lösen sich während dem Beleimen kleine Partikel von den Rübenschnitzel ab und sammeln sich am Boden an. Zum anderen kann bedingt durch die 25 mm starken Distanzen kein hoher Pressdruck auf den Kuchen wirken, wodurch die Oberseite nicht so stark komprimiert werden kann, wie die Unterseite.

Diese Situation tritt bei der Herstellung von Zuckerrübenschnitzelplatten mit einer Zieldichte von 250 kg/m³ deutlich stärker auf, weshalb die Produktion mit dem bisher durchgeführten Verfahren nicht möglich ist.

Der erste Versuch eine hochdichte Platte herzustellen wurde bewusst mit wenig Temperatur und vergleichsweise hohem Beleimgrad durchgeführt, um alle Risikofaktoren (Delaminierung, zu geringer Leimanteil) klein zu halten. Wie man beim zweiten Versuch gesehen hat, wurde diese Mutmaßung auch bestätigt, da die Platte

bei 150°C und einem Beleimgrad von 5% nicht in der Lage war, den auftretenden Kräften der Presse standzuhalten. Die Ursache dafür kann zum einen der geringe Beleimgrad, und/oder die Kombination mit dem Schmelzpunkt von Harnstoff bei 132°C sein. Eine genaue Ursachenforschung wurde diesbezüglich nicht unternommen, da es den Umfang der Masterarbeit überschreiten würde.

5.4. Prüfungen zum Brandverhalten: Einzelflammtest

Brandhemmende Eigenschaften werden grundsätzlich durch zwei Methoden erreicht:

- Chemische Wirkung
- Physikalische Wirkung

Wobei die chemische Wirkung prinzipiell das Ziel hat, Radikalreaktionen zu stören, die während der Verbrennung stattfinden und das Material wird durch Kohlebildung vor weiterer Erwärmung geschützt. Die Physikalische Methode hingegen setzt auf die Reduzierung der Temperatur durch endothermische Reaktionen, welche die Ausbreitung des Feuers durch die Verdrängung von Sauerstoff mit nichtbrennbaren Gasen unterbindet und zugleich eine Schutzschicht an der Oberfläche bildet (Nikolaeva und Kärki 2011).

Die Ergebnisse aus der Prüfung des Brandverhaltens zeigen eine starke Rußbildung an der Flammeinwirkung. Levan (1984) beschreibt eine starke Verkohlung der Oberfläche, welche auf Dehydratisierungsreaktionen, hauptsächlich wegen der Cellulose im Holz zurückzuführen sind.

Der Cellulosegehalt von Zuckerrübenschnitzel wird in der Literatur zwischen 21% und 23% der Trockenmasse angegeben, wobei der Hemicellulosegehalt zwischen 30% und 45% (je nach Analyseverfahren) stärker variiert (Olmos und Hansen 2012, Martinez, et al. 2009, Pinkowska, et al. 2019, Karaky, et al. 2019).

Der Brandschutz kann nicht durch einen einzelnen Mechanismus beschrieben werden, sondern viel mehr durch eine Kombination aus mehreren Mechanismen (Levan 1984). Wobei hier nochmals darauf hingewiesen wird, dass die Zuckerrübenplatten in dieser Arbeit mit keinem Brandschutzmittel versetzt wurden.

Die Proben des Einzelflammtests mit einer Prüfdauer von 30 Sekunden und 10 Minuten unterscheiden sich nur in der Größe des Rußflecks, wodurch angenommen wird, dass die Verkohlung der Oberfläche einen sehr effizienten Brandschutz darstellt.

Die abfallenden Brandrückstände der Trockenschnitzelplatten treten hauptsächlich an der 350 kg/m³ Platte und hier an der Produktionsunterseite auf, was darauf zurückzuführen ist, dass aufgrund ihrer Porosität einige Partikel nicht ausreichend in der Platte integriert sind.

Die Nichtbrennbarkeit von Heraklith® basiert auf der Zugabe von Zement, Magnesitmörtel und Gips, wobei das Gewichtsverhältnis von Gips : Holzwolle 6,5 : 4 beträgt (Kollmann 1939). Wie auch bei den Trockenschnitzelplatten, setzt sich das Brandschutzverhalten aus mehreren Mechanismen zusammen, wobei durch den hohen Gipsgehalt die thermische Theorie ein Hauptbestandteil ausmachen dürfte, denn die Theorie der thermischen Absorption basiert auf Chemikalien, die eine große Menge an Hydratwasser (Kristallwasser) beinhalten (Levan 1984). Jaworska (2012) beschreibt die Hydratation von Anhydrid und die Dehydratisierung von Gips als reversibel, wodurch sich das im Gips gebundene Hydratwasser lösen kann.

Die abfallenden Aschestücke der Heraklith® - Proben sind völlig ausgeglüht und können das untenliegende Papier nicht entzünden.

Somit kann Forschungsfrage 2, ob Platten aus Zuckerrübenschnitzeln brennbar sind, mit *nein* beantwortet werden. Jedoch wird an dieser Stelle erwähnt, dass der Einzelflammtest keine „harte“ Methode ist, um das Brandverhalten eines Werkstoffes festzustellen.

5.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Wärmeleitfähigkeiten zu erhalten, werden die produzierten Trockenschnitzelplatten in Abbildung 31 mit drei handelsüblichen Naturwerkstoffen verglichen, wobei die Referenzproben ISOTEX, Fichte, Heraklith® und AGEPAN THD Static nicht eigenhändig geprüft wurden, sondern auf die Herstellerangaben bzw. auf Literatur zurückgegriffen wurde (http://isotex.at/ kein Datum, Niemz, Sonderegger und Hering 2010, Sonae Arauco 2019, Nierobis 2002). Die Heraklith® -Platte wird je nach Quelle mit einer unterschiedlichen Dichte angegeben, weshalb in der Grafik ein Mittelwert der Quellen verwendet wird (Nierobis 2002, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2014).

Wie man in Abbildung 31 erkennen kann, ergibt sich ein mehr oder wenig klarer Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit der Zuckerrübenschnitzelplatten. Rebolledo, Cloutier, & Yemele (2018) beschreiben einen Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit λ und sowohl der Dichte, als auch der Porosität einer Fasermatte bei der MDF Herstellung, da die Wärmeleitung

vor allem an den Fasern stattfindet und bei geringerer Porosität die Wärme an den anliegenden Fasern besser weitergegeben werden kann. In Abbildung 30 erkennt man die hohe bzw. geringe Porosität der 350/100/8 bzw. 450/100/8 Platte sowohl an der Schnittkante als auch an der Oberfläche.

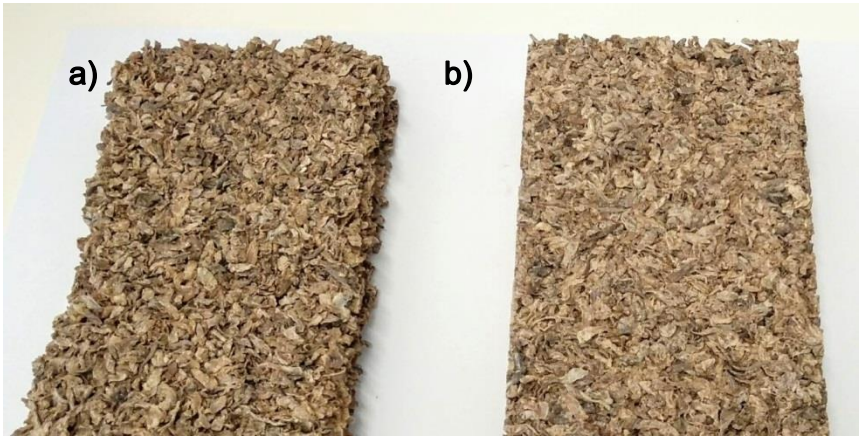

Abbildung 30: Vergleich der Porositäten einer 350/100/8 Platte (a) und 450/100/8 Platte (b).

Die Wärmeleitfähigkeit steigt linear mit der Kerntemperatur bei der Prüfung, was auch durch Yu et al. und Troppová et al. beschrieben wird (2011, Troppová, et al. 2015). Bei der ersten Messung wurde ohne die danach benutzte dünne Schutzfolie an derselben Platte eine um 1% leicht erhöhte Wärmeleitfähigkeit festgestellt. Da dieser Versuch nicht mit allen Platten durchgeführt werden konnte, wird darauf hingewiesen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Wassergehalt ansteigt, da Wasser eine höhere Leitfähigkeit als die Zellwand oder Luft hat (Zhou, et al. 2013).

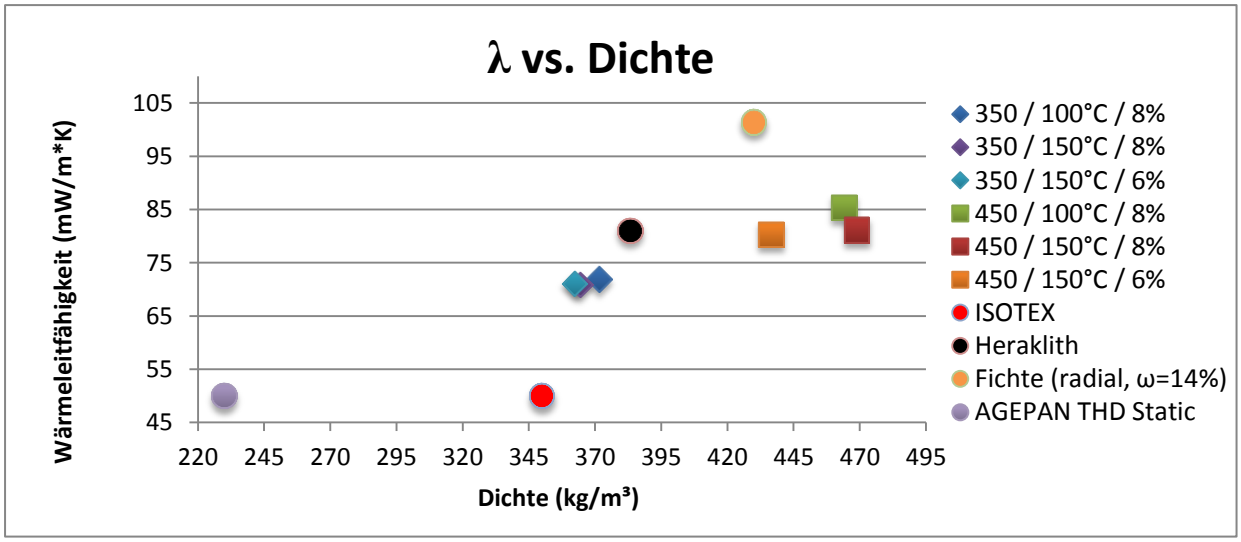

Abbildung 31: Wärmeleitfähigkeit der Zuckerrübenplatten und drei Referenzproben in Abhängigkeit zur Dichte.

Forschungsfrage 3 – Haben Platten aus Zuckerrübenschnitzeln eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Heraklith – kann mit *ja* beantwortet werden, wobei darauf

hingewiesen wird, dass in dieser Arbeit nur eine geringe Anzahl an Platten geprüft wurden, da der Fokus der Masterarbeit nicht auf die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit gerichtet war. Wenn man die hergestellten ZRS Platten mit der AGEPAN THD Platte vergleicht, wird ersichtlich, dass diese in Abbildung 31 auf der selben gedachten Geraden liegen, was auf ähnliche thermische Eigenschaften der Naturprodukte zurückzuführen ist.

5.6. Drei-Punkt-Biegeversuch inkl. statistischer Auswertung

Im Zuge des Drei-Punkt-Biegeversuches kann ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Beleimgrad, der Zieldichte und der Biegefestigkeit beobachtet werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Aussagen von Balama, Gillah, & Mbwambo (2012), dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Dichte und der Festigkeit einer Platte gibt, wobei auch bei der Erhöhung von Klebstoff mit Festigkeitszunahmen zu rechnen ist.

Die Ergebnisse in Punkt 0 zeigen einen Zusammenhang mit dem E-Modul und der Biegefestigkeit. Alle Platten, die eine hohe Biegefestigkeit aufweisen, haben einen verhältnismäßig höheren E-Modul. Die Korrelation zwischen Biegefestigkeit und E-Modul wird auch vom Forest Products Laboratory (1973) erwähnt.

5.6.1. Biegefestigkeit

Die in Punkt 4.7 dargestellten Box Plots werden in Tabelle 5 mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse und mittels Post-hoc-Tests nach Tuckey beschrieben.

Tabelle 5: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird die Biegefestigkeit der 350/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern.

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung		(J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall Untergrenze	95%-Konfidenzintervall Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,07167	0,04701	0,947	-0,0876	0,2310
		350/100/6	0,10833	0,04701	0,519	-0,0510	0,2676
		450/100/10	-,43583*	0,04701	0,000	-0,5951	-0,2765
		450/100/8	-0,11333	0,04701	0,445	-0,2726	0,0460
		450/100/6	-0,03250	0,04701	1,000	-0,1918	0,1268
		350/150/10	-0,00083	0,05757	1,000	-0,1959	0,1943
		350/150/8	0,07083	0,05757	0,990	-0,1243	0,2659
		350/150/6	0,11583	0,05757	0,723	-0,0793	0,3109
		450/150/10	-,34583*	0,05757	0,000	-0,5409	-0,1507
		450/150/8	-,22583*	0,05757	0,009	-0,4209	-0,0307
		450/150/6	-0,03917	0,05757	1,000	-0,2343	0,1559
		Heraklith	-,61500*	0,04701	0,000	-0,7743	-0,4557

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Es kann mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gesagt werden, dass die 350/100/10 Platte eine geringere Biegefestigkeit aufweist, als folgende Platten: 450/100/10, 450/150/10, 450/150/8 und der Heraklith® Platte, wie in Tabelle 5 ersichtlich (rot unterstrichen, Signifikanz < 0,05). Die Annahme, dass die 450/100/8 Platte eine signifikant höhere Biegefestigkeit als die 350/100/10 Platte aufweist, muss abgelehnt werden, da das Signifikanzniveau mit 0,445 deutlich größer als 0,05 ist (grün unterstrichen).

Im gleichen Zug zeigt sich, dass die Platten 450/100/6, 350/150/10, 450/150/6 und 350/150/8 mit hoher Wahrscheinlichkeit eine ähnliche Biegefestigkeit wie die 350/100/10 Platten aufweisen. Wie zuvor erwähnt, sind die statistischen Aussagen der mit 150°C gepressten Proben mit Vorsicht zu genießen, da jeweils nur die Hälfte (6 Stk.) hergestellt und geprüft wurden.

Die einfaktorielle ANOVA zeigt beim Vergleich der 450/100/10 mit der Heraklith® Platte in Tabelle 6 eine signifikant geringere Biegefestigkeit (rot unterstrichen). Es wird auch hier wieder ersichtlich, dass die Presstemperatur keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit hat, da die 450/150/10 Platte mit einer Signifikanz von 0,937 identisch zur 450/100/10 Platte ist (grün unterstrichen).

Tabelle 6: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird die Biegefestigkeit der 450/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern.

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
						Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	450/100/10	350/100/10	,43583*	0,04701	0,000	0,2765	0,5951
		350/100/8	,50750*	0,04701	0,000	0,3482	0,6668
		350/100/6	,54417*	0,04701	0,000	0,3849	0,7035
		450/100/8	,32250*	0,04701	0,000	0,1632	0,4818
		450/100/6	,40333*	0,04701	0,000	0,2440	0,5626
		350/150/10	,43500*	0,05757	0,000	0,2399	0,6301
		350/150/8	,50667*	0,05757	0,000	0,3116	0,7018
		350/150/6	,55167*	0,05757	0,000	0,3566	0,7468
		450/150/10	0,09000	0,05757	0,937	-0,1051	0,2851
		450/150/8	,21000*	0,05757	0,023	0,0149	0,4051
		450/150/6	,39667*	0,05757	0,000	0,2016	0,5918
		Heraklith	-,17917*	0,04701	0,014	-0,3385	-0,0199

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Die in Karaky, et al. hergestellten Composite aus Zuckerrübenschnitzel und Kartoffelstärke weisen ähnliche Festigkeitswerte für die Druckfestigkeit (zwischen 0,37 und 0,52 N/mm²) auf, sind jedoch bei der Biegefestigkeit deutlich schwächer (zwischen 0,11 N/mm² und 0,21 N/mm²) (2019). Der Biege-Elastizitätsmodul des ZRS-Stärke Verbundwerkstoffes ist deutlich höher (2,06 – 3,17 N/mm²) als der in dieser Arbeit hergestellten Platten, was auf den hohen Stärkegehalt (10% - 40%) und

die damit verbundene bessere Ummantelung der ZRS zurückzuführen sein könnte (Karaky, et al. 2019).

Aufgrund der statistischen Ergebnisse kann die Hypothese, dass sich ein höherer Beleimgrad positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, für die Biegefestigkeit der Platten mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ zumindest bei einem Vergleich des Beleimgrades von 10% zu 8% und 6% verifiziert werden (Tabelle 7). Der Grund dafür könnte sein, dass aufgrund des BG von 10% relativ viel Wasser in das Material gebracht wurde und durch das Quellverhalten der ZRS eine höhere Verdichtung während dem Pressen stattfinden konnte.

Für die Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ muss diese Hypothese verworfen werden. Hier wird zwar prozentuell gleich viel Wasser in die Platte mit 10% BG eingebracht, jedoch ist die Zieldichte geringer und somit der auf die Platte ausgewirkte Druck durch die Presse geringer.

Tabelle 7: Varianzanalyse der beiden Zieldichten mit den Beleimgraden.

Mehrfachvergleiche							
Abhängige Variable:	Biegefestigkeit						
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenbezeichnung			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,07167	0,04701	0,947	-0,0876	0,2310
		350/100/6	0,10833	0,04701	0,519	-0,0510	0,2676
	350/100/8	350/100/6	0,03667	0,04701	1,000	-0,1226	0,1960
	450/100/10	450/100/8	,32250*	0,04701	0,000	0,1632	0,4818
		450/100/6	,40333*	0,04701	0,000	0,2440	0,5626
	450/100/8	450/100/6	0,08083	0,04701	0,882	-0,0785	0,2401

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Die Hypothese, dass sich eine Erhöhung der Presstemperatur positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, muss bei der Biegefestigkeit verworfen werden, wie in Tabelle 8 ersichtlich wird.

Tabelle 8: Varianzanalyse unterschiedlicher Beleimgrade mit den beiden Presstemperaturen.

Mehrfachvergleiche							
Abhängige Variable:	Biegefestigkeit						
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenbezeichnung			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/150/10	-0,00083	0,05757	1,000	-0,1959	0,1943
	350/100/8	350/150/8	-0,00083	0,05757	1,000	-0,1959	0,1943
	350/100/6	350/150/6	0,00750	0,05757	1,000	-0,1876	0,2026
	450/100/10	450/150/10	0,09000	0,05757	0,937	-0,1051	0,2851
	450/100/8	450/150/8	-0,11250	0,05757	0,759	-0,3076	0,0826
	450/100/6	450/150/6	-0,00667	0,05757	1,000	-0,2018	0,1884

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Die Hypothese, dass sich eine höhere Rohdichte positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, kann für die Biegefestikeit für die Beleimgrade von 10% und 8% verifiziert werden. Für einen Beleimgrad von 6% muss diese Hypothese verworfen werden (Tabelle 9). Der Grund für die geringen Unterschiede bei den Platten mit 6% BG im Vergleich zu den höheren Beleimgraden könnte die bereits zuvor erwähnte geringere Wasseraufnahme mit dem Leim sein und die dadurch verbundene geringere Presskraft auf die Platten. Durch die geringere Wasseraufnahme haben die Platten eine geringere Wärmeleitfähigkeit, wodurch die Temperatur vor allem bei niedrigeren Rohdichten nicht so gut in den Kern transportiert werden können (Cai, Muehl und Winandy 2006).

Tabelle 9: Varianzanalyse unterschiedlicher Beleimgrade mit den beiden Zieldichten.

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable:	Biegefestigkeit						
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenbezeichnung			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	450/100/10	-,43583*	0,04701	0,000	-0,5951	-0,2765
	350/100/8	450/100/8	-,18500*	0,04701	0,009	-0,3443	-0,0257
	350/100/6	450/100/6	-0,14083	0,04701	0,140	-0,3001	0,0185

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

5.6.2. Biege-Elastizitätsmodul

Die Biege-Elastizitätsmodule der ZRS-Platten können im Allgemeinen als sehr niedrig beschrieben werden. In Tabelle 10 ist die einfaktorielle ANOVA für die 350/100/10 Platte im Vergleich mit den restlichen geprüften Platten ersichtlich.

Tabelle 10: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird der Biege-Elastizitätsmodul der 350/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern.

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,00570	0,01621	1,000	-0,0493	0,0607
		350/100/6	0,00766	0,01657	1,000	-0,0486	0,0639
		450/100/10	-0,03606	0,01621	0,576	-0,0910	0,0189
		450/100/8	-0,01877	0,01621	0,994	-0,0737	0,0362
		450/100/6	-0,00448	0,01621	1,000	-0,0595	0,0505
		350/150/10	-0,00027	0,01985	1,000	-0,0676	0,0671
		350/150/8	0,00642	0,01985	1,000	-0,0609	0,0738
		350/150/6	0,00725	0,02563	1,000	-0,0797	0,0942
		450/150/10	-0,02611	0,01985	0,983	-0,0934	0,0412
		450/150/8	-0,01533	0,01985	1,000	-0,0827	0,0520
		450/150/6	-0,00514	0,01985	1,000	-0,0725	0,0622
		Heraklith	-,22776*	0,01621	0,000	-0,2827	-0,1728

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

Hier zeigt sich, dass sich der E-Modul nur von der Heraklith®-Platte höchst signifikant unterscheidet, wobei der Unterschied hier deutlicher ausgeprägt ist, als bei der Biegefestigkeit.

Sowohl der sehr niedrige Biege-Elastizitätsmodul, als auch die im Vergleich zu Heraklith® geringere Biegefestigkeit sind auf die von Grund auf unterschiedlichen Plattenarten zurückzuführen. Die ZRS – Platten bestehen aus Partikeln, ähnlich einer Spanplatte, wobei die Heraklith®-Platten aus zementgebundener Holzwolle bestehen, welche zum einen durch einen hohen Bindemittelgehalt und zum anderen durch die langen Holzwollespäne (mindestens 80mm (Kollmann 1939)) deutlich besser vernetzt sind.

Für den Biege-Elastizitätsmodul muss die Hypothese, dass sich ein höherer Beleimgrad positiv auswirkt, verworfen werden, da das niedrigste Signifikanzniveau von allen Proben beim Vergleich der 450/100/10 und 450/100/6 Platte mit 0,763 sehr deutlich über 0,05 liegt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Varianzanalyse des Biege-Elastizitätsmodul mit unterschiedlichem Beleimgrad und beiden Zieldichten.

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul	Mehrfachvergleiche					
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,00570	0,01621	1,000	-0,0493	0,0607
		350/100/6	0,00766	0,01657	1,000	-0,0486	0,0639
	350/100/8	350/100/6	0,00197	0,01657	1,000	-0,0542	0,0582
	450/100/10	450/100/8	0,01730	0,01621	0,997	-0,0377	0,0723
		450/100/6	0,03159	0,01621	0,763	-0,0234	0,0866
	450/100/8	450/100/6	0,01429	0,01621	1,000	-0,0407	0,0693

Für den Biegeelastizitätsmodul muss die Hypothese, dass sich eine höhere Rohdichte positiv auswirkt abgelehnt werden, wie aus Tabelle 11 ersichtlich wird (Signifikanzniveau >> 0,05). Der Grund dafür sind die grundsätzlich sehr niedrigen Biegeelastizitätsmodule und der geringe Stichprobenumfang.

Tabelle 11: Varianzanalyse des Biege Elastizitätsmodul mit unterschiedlichem Beleimgrad und Rohdichte.

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul	Mehrfachvergleiche					
						95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	450/100/10	-0,03606	0,01621	0,576	-0,0910	0,0189
	350/100/8	450/100/8	-0,02446	0,01621	0,951	-0,0794	0,0305
	350/100/6	450/100/6	-0,01214	0,01657	1,000	-0,0684	0,0441

Die Hypothese, dass sich eine höhere Presstemperatur positiv auf den Biege-Elastizitätsmodul auswirkt, muss ebenfalls verworfen werden, wie in Tabelle 13 deutlich wird.

Forschungsfrage 1: Können formstabile Platten aus Zuckerrübenschnitzel im Trockenverfahren hergestellt werden, kann im Zuge der Ergebnisse mit *ja* beantwortet werden. Je weniger Beleimgrad und je geringer die Rohdichte die Platten aufweisen, desto poröser und bröseliger werden die Platten. Durch einen größeren Stichprobenumfang könnten unter Umständen die Ergebnisse klarer getrennt werden (weniger Streuung).

Tabelle 13: Varianzanalyse des Biege-Elastizitätsmoduls beider Rohdichten mit unterschiedlichen Presstemperaturen

Mehrfachvergleiche							
Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
			Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname						Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/150/10	-0,00027	0,01985	1,000	-0,0676	0,0671
	350/100/8	350/150/8	0,00072	0,01985	1,000	-0,0666	0,0681
	350/100/6	350/150/6	-0,00042	0,02586	1,000	-0,0881	0,0873
	450/100/10	450/150/10	0,00995	0,01985	1,000	-0,0574	0,0773
	450/100/8	450/150/8	0,00344	0,01985	1,000	-0,0639	0,0708
	450/100/6	450/150/6	-0,00066	0,01985	1,000	-0,0680	0,0667

Die niedrigen Biegeelastizitätsmodule werden auf den Aufbau der Platten zurückgeführt. Da die ZRS sehr kurz sind, können sich nur wenige Kontaktflächen zwischen den Trockenschnitzeln bilden, was sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt.

6. Schlussfolgerungen

Im Zuge der Masterarbeit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, formstabile Platten aus Zuckerrübenschnitzeln im Trockenverfahren herzustellen. Es stellte sich heraus, dass mit einem Beleimgrad von 6% noch immer formstabile Platten hergestellt werden konnten und bei einem BG von 10% Biegefestigkeiten erreicht wurden, die nur etwa 23% unter dem von Heraklith®-Platten waren. Während dem Beleimen und dem Pressvorgang zeigte sich, dass UF Harz mit sehr hohem Wassergehalt (Mischverhältnis UF : H_2O = 5 : 4,55) bessere Ergebnisse liefert. An dieser Stelle wird angemerkt, dass Heraklith® unter Umständen keine geeignete Referenz darstellt, da die hergestellten Platten eher einer Spanplatte gleichen, als einer zementgebundenen Holzwolle Leichtbauplatte.

Beim Variieren der Rohdichte stellte sich heraus, dass die Platten mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ sehr gute Biegefestigkeiten aufweisen und nach dem Zuschnitt weder bröseln oder zerfallen. Die Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ in Verbindung mit dem geringsten Beleimgrad weisen eine erhöhte Porosität auf und neigen an den Kanten zum Bröseln. Der Versuch, Platten mit geringeren Zieldichten (250 kg/m³) herzustellen gelingt mit dem Trockenverfahren nicht. Für die Herstellung von Platten mit einer geringeren Zieldichte könnten zum Beispiel geschäumte Bindemittel zielführend sein.

Sehr zufriedenstellende Ergebnisse wurden vor allem beim Brandschutz erzielt. Die hergestellten Platten aus ZRS beginnen selbst nach 10 minütigem Flammkontakt nicht zu brennen, obwohl während der Produktion keine Brandschutzmittel beigemengt wurden.

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitstests zeigen, dass sich die hergestellten Platten ähnlich verhalten, wie auf dem Markt erhältliche Naturfaserprodukte (mit sinkender Rohdichte sinkt die Wärmeleitfähigkeit).

Ein Problem sind die starken hygroskopischen Eigenschaften der Trockenschnitzel. Durch die starke Wasseraufnahme eignen sich die hergestellten Platten in unbehandelter Form nicht für den Außenbereich oder Räume in denen Spritzwasser an die Platten gerät. Für weitere Forschungen könnten ZRS Platten hergestellt werden, die entweder mit einer Oberflächenbeschichtung versehen, oder mittels hydrophober Mittel behandelt werden, um die starke Wasseraufnahme der Trockenschnitzel zu unterbinden.

Basierend aus den Ergebnissen der Arbeit konnte bewiesen werden, dass Zuckerrübenschnitzel ein großes Potenzial in der Bau- und Werkstoffbranche haben. Es bedarf noch weiterer Forschungen um den nachwachsenden Rohstoff genauer zu verstehen und gezielter einsetzen zu können.

7. Literaturverzeichnis

Levan, Susan L. „Chemistry of Fire Retardancy, The Chemistry of solid Wood.“ *American Chemistry Society*, 22. August 1984: 532-574.

AGRANA Beteiligungs-AG. „agrana.com.“ 2016. https://www.agrana.com/fileadmin/inhalte/agrana_group/2017/images/Sugar/Von_der_R%C3%BCbe_zum_Zucker_2016.pdf (Zugriff am 24. Oktober 2019).

Akram, M., C.K. Tan, D.R. Garwood, M. Fisher, D.R. Gent, und W.G. Kaye. „Co-firing of pressed sugar beet pulp with coal in a laboratory-scale fluidised bed combustor.“ *Applied Energy*, November 2014: 1-8.

Balama, C., P.R. Gillah, und L. Mbwambo. „Strength Properties of Chipboards Available in Tanzania Market.“ *1anzania Journal of Forestry and Nature Conservation, Volume 82(1)*, Juni 2012.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. „Grüner Bericht 2018.“ Wien, 2018.

Cai, Zhiyong , James H. Muehl, und Jerrold E. Winandy. „Effects of panel density and mat moisture content on processing medium density fiberboard.“ *Forest Products Journal*, Oktober 2006: 20-25.

Duraisam, Ramesh, Ketemaw Salelgn, und Abiyu Kerebo Berekete. „Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and it Bagasse: A Review.“ *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Jänner 2017: 222-233.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. . *Marktübersicht Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.* Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe , 2014.

Forest Products Laboratory. *Basic Engineering Properties of Particleboard.* Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture Forest Service, 1973.

Hemmingsen, A. K. T., et al. „Water Adsorption in Feed Ingredients for Animal Pellets at Different Temperatures, Particle Size, and Ingredient Combinations.“ *Drying Technology*, Juni 2008: 738-748.

http://isotex.at/. kein Datum. http://isotex.at/porose-holzfaserplatte-25-mm/ (Zugriff am 7. Oktober 2019).

http://www.lambda-messtechnik.de/. 2019. http://www.lambda-messtechnik.de/waermeleitfaehigkeitsmessgeraet-lambda-meter-ep500e/ep500e-aufbau-funktion.html (Zugriff am 22. Juni 2019).

Jaworska, Joanna. „Crystallization, Alternation and Recrystallization of Sulphates.“ In *Advances in Crystallization Processes*, von Yitzhak Mastai, 465-482. IntechOpen, 2012.

Karaky, Hamzé, et al. „Characterization of beet-pulp fiber reinforced potato starch biopolymer composites for building applications.“ *Construction and Building Materials 203*, 5. Februar 2019: 711-721.

Kimoto, K., E. Ishimori, H. Sasaki, und T. Maku. „Effects of Resin Content and Particle Dimension on the Physical and Mechanical Properties of Low-density Particle Boards.“ *Wood Research No. 32*, März 1964: 1-14.

Kollmann, F. „Die Herstellung von Leichtbauplatten aus Holzwolle.“ *Holz als Roh- und Werkstoff*, Februar 1939: 55-61.

Martinez, Martina, Beatriz Gullón, Remedios Yánes, José Luis Alonso, und Juan Carlos Parajó. „Direct Enzymatic Production of Oligosaccharide Mixtures from Sugar Beet Pulp: Experimental Evaluation and Mathematical Modeling.“ *Journal of Agricultural and Food Chemistry Article*, 28. April 2009: 5510-5517.

Meyer, Niels, und Heiko Thoemen. „Gas pressure measurements during continuous hot pressing.“ *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2007: 49-55.

Monreal, P., L.B. Mboumba-Mamboundou, R.M. Dheilly, und M. Quéneudec. „Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites.“ *Cement & Concrete Composites 33*, 2011: 301-308.

Niemz, Peter, Walter Sonderegger, und Stefan Hering. „Thermal conductivity of Norway spruce and European beech in the anatomical directions.“ *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Forestry and Wood Technology No 72*, 2010: 66-72.

Nierobis, Lars. *http://www.waermedaemmstoffe.com.* 2002. http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/leichtbauplatten.htm (Zugriff am 8. Oktober 2019).

Nikolaeva, Marina, und Timo Kärki. „A Review of Fire Retardant Processes and Chemistry, with Discussion of the Case of Wood-plastic Composites.“ *Baltic Forestry*, 2011: 314-326.

Olmos, J. Concha, und M.E. Zúñiga Hansen. „Enzymatic depolymerization of sugar beet pulp: Production and characterization of pectin and pectic-oligosaccharides as a potential source for functional carbohydrates.“ *Chemical Engineering Journal*, 30. März 2012: 29-36.

Pinkl, Stefan, Stefan Veigel, Jérôme Colson, und Wolfgang Gindl-Altmutter. „Nanopaper Properties and Adhesive Performance of Microfibrillated Cellulose from Different (Ligno-)Cellulosic Raw Materials.“ *Polymers*, 31. Juli 2017: 326.

Pinkowska, Hanna, Małgorzata Krzywonos, Paweł Wolak, und Adrianna Złocinska. „Pectin and Neutral Monosaccharides Production during the Simultaneous Hydrothermal Extraction of Waste Biomass from Refining of Sugar—Optimization with the Use of Doehlert Design.“ *Molecules*, 29. Januar 2019: 1-11.

Popović, Mladjan, Jovan Miljković, Jaroslava Budinski Simendić, Jelena Pavličević, und Ivan Ristić. „Curing characteristics of low emission Urea-Formaldehyde Adhesive in the presence of Wood.“ *Wood Research Vol. 56 No. 4*, Januar 2011: 589-600.

Ramanzin, Maurizio, Luca Bailoni, und Giovanni Bittante. „Solubility, Water-Holding Capacity, and Specific Gravity of Different Concentrates.“ *Nutrition, Feeding and Calves*, 1994: 774-781.

Rebolledo, Pamela , Alain Cloutier, und Martin-Claude Yemele. „Effect of Density and Fiber Size on Porosity and Thermal Conductivity of Fiberboard Mats.“ *Fibers, Natural Fibre Biocomposites*, 19. Oktober 2018.

Serena, A, und Knud Erik Bach Knudsen. „Chemical and physicochemical characterisation of co-products from the vegetable food and agro industries.“ *Animal Feed Science and Technology 139*, 2007: 109-124.

Sonae Arauco. *https://www.sonaearauco.com/de.* 2019. https://www.sonaearauco.com/actions.php?action=1&f=2&name=869.6%20KB&src=file712_de.pdf&b=0 (Zugriff am 8. Oktober 2019).

Statistik Austria. *Statistik der Landwirtschaft 2017.* Wien: Verlag Österreich GmbH, 2018.

Troppová, Eva, Matej Švehlík, Jan Tippner, und Rupert Wimmer. „Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards.“ *Materials and Structures*, 2015: 4077–4083.

Umweltbundesamt GmbH. „Klimaschutzbericht 2018.“ *https://www.umweltbundesamt.at.* 2018. https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0660.pdf (Zugriff am 24. Oktober 2019).

Wimmer, Rupert. „Vorlesung: Wood- Industrial Processes: Wood- and Fibre-based Material.“ Wien, Oktober 2017.

Yu, Zi-Tao, Xu Xu, Li-Wu Fan, Ya-Cai Hu, und Ke-Fa Cen. „Experimental measurements of thermal conductivity of wood species in China: effects of density, temperature and moisture content.“ *Forest Products Journal 61 (2)*, 2011: 130-135.

Zhou, Jianhui, Haibin Zhou, Chuanshuang Hu, und Shuofei Hu. „Measurement of Thermal and Dielectric Properties of Medium Density Fiberboard with Different Moisture Contents.“ *BioRessources 8(3)*, 21. Juni 2013: 4185-4192.

8. Anhang

8.1. Feuchtebestimmung der Zuckerrübenschnitzel

Direkt vom Lieferanten:

	Vor der Trocknung	Nach der Trocknung
Probe 1	4,9064 g	4,3668 g
Probe 2	4,6188 g	4,1159 g
Probe 3	3,9207 g	3,5 g

Der Feuchtegehalt wird wie folgt berechnet:

$$u\,[\%] = \frac{m_\omega}{m_0} * 100$$

Damit ergeben sich folgende Feuchtegehalte für die Proben 1-3:

$$u_1 = \frac{4{,}9064 - 4{,}3668}{4{,}3668} * 100 = 12{,}36\%$$

$$u_2 = \frac{4{,}6188 - 4{,}1159}{4{,}1159} * 100 = 12{,}22\%$$

$$u_3 = \frac{3{,}9207 - 3{,}5}{3{,}5} * 100 = 12{,}02\%$$

Der Mittelwert des Feuchtegehaltes beträgt somit 12,2% für die Trockenschnitzel vom Lieferanten.

Trockenschnitzel im Klimaraum bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte für drei Wochen:

	Vor der Trocknung	Nach der Trocknung
Probe 1	5,3447 g	4,626 g
Probe 2	5,4943 g	4,7493 g
Probe 3	6,244 g	5,4109 g

Damit ergeben sich folgende Feuchtegehalte für die Proben 1-3:

$$u_1 = \frac{5{,}3447 - 4{,}626}{4{,}626} * 100 = 15{,}54\%$$

$$u_2 = \frac{5{,}4943 - 4{,}7493}{4{,}7493} * 100 = 15{,}69\%$$

$$u_3 = \frac{6{,}244 - 5{,}4109}{5{,}4109} * 100 = 15{,}4\%$$

Der Mittelwert des Feuchtegehaltes für die Trockenschnitzel im Normklima beträgt somit 15,54%.

8.2. Siebanalyse

Bei der Bestimmung des d50 – Wertes benötigt man den kumulierten durchgehenden Massenanteil aller Proben, um zu sehen mit welchem Sieb der Sprung über 50% erfolgt. Im Anschluss errechnet sich der Wert durch Interpolation wie folgt:

$$1{,}4mm + (0{,}5\% - 25{,}59\%) * \left(\frac{2 - 1{,}4}{79{,}57\% - 25{,}59\%}\right) = 1{,}67\ mm$$

In Tabelle 14 sind alle sechs einzelnen Fraktionen der Siebanalyse dargestellt.

Tabelle 14: Vollständige Auflistung aller Fraktionen der Siebanalyse.

Siebbezeichnung	Fraktion [mm]	Masse der Fraktion 1 [g]	Masse der Fraktion 2 [g]	Masse der Fraktion 3 [g]	Masse der Fraktion 4 [g]	Masse der Fraktion 5 [g]	Masse der Fraktion 6 [g]	Gesamtmasse der Fraktionen [g]	Prozentualer Massenanteil beruhend auf der Gesamt-masse aller Fraktionen in Spalte (I)	Kumulativer durchgehender Massen-anteil (Summierung der Massen-anteile in % in Spalte K)
1.Sieb mit 4 mm	größer 4	2,874	3,0424	4,2045	3,1172	3,2604	2,368	18,8665	7,91%	100,00%
2.Sieb mit 3,15 mm	größer 3,15	4,2963	4,6091	5,9418	5,4976	4,9983	4,5012	29,8443	12,52%	92,09%
3.Sieb mit 2 mm	größer 2	22,0438	20,7839	21,526	20,9516	22,197	21,171	128,6733	53,98%	79,57%
4.Sieb mit 1,4 mm	größer 1,4	7,861	8,0925	6,149	7,4469	7,6542	8,4161	45,6197	19,14%	25,59%
5.Sieb 1 mm	größer 1	2,0437	2,0445	1,471	1,9405	1,3772	2,3869	11,2638	4,73%	6,45%
6.Sieb mit 0,4 mm	größer 0,4	0,5278	1,0346	0,4308	0,7424	0,3032	0,843	3,8818	1,63%	1,72%
7.Sieb mit 0,2 mm	größer 0,2	0,0123	0,067	0,0139	0,0236	0,0089	0,022	0,1477	0,06%	0,09%
Sammelschale	< 0,2	0,0067	0,0248	0,0095	0,0137	0,0144	0,0085	0,0776	0,03%	0,03%
Summe		39,6656	39,6988	39,7465	39,7335	39,8136	39,7167	238,3747	100,00%	

8.3. Beleimen der Zuckerrübenschnitzel

Berechnungen der Platte mit 20mm Stärke und einer Zieldichte von 400 kg/m³:

Volumen:

$$25\ cm + 25\ cm + 2\ cm = 1250\ cm^3$$

Bedarf an Trockenschnitzel:

$$1250\ cm^3 * 0{,}4\ \frac{g}{cm^3} = 500\ g$$

Berechnung der Trockenmasse bei 10% Feuchtegehalt:

$$\frac{500\ g}{1{,}1} = 454{,}54\ g$$

Ein Beleimgrad von 10% ergibt

$$454{,}54\ g * 0{,}1 = 45{,}45\ g$$

Leim, was bei einem Leim : Wasser Verhältnis von 5 : 3,5

$$\frac{45{,}45}{5} * 3{,}5 = 31{,}81\ g$$

Wasser ergibt. Daraus ergibt sich ein Endgewicht der beleimten Zuckerrübenschnitzel von:

$$31{,}81\ g + 45{,}45\ g + 500\ g = 577{,}27\ g$$

Für die Zementgebundene Platte werden die selben Werte übernommen, wobei der Leim durch Zement ersetzt wird.

Bei den großen Platten werden für die beiden Zieldichten von 450 kg/m³ und 350 kg/m³ folgende Mengen an Trockenschnitzel benötigt:

Das Volumen beträgt für beide Platten

$$50\ cm * 30\ cm * 2{,}5\ cm = 3750\ cm^3$$

Die benötigte Masse an Trockenschnitzel ergibt sich durch die Multiplikation mit der Zieldichte.

Für 350 kg/m³:

$$3750\ cm^3 * 0{,}35\ \frac{g}{cm^3} = \ 1312\ g$$

Für 450 kg/m³:

$$3750\ cm^3 * 0{,}45\ \frac{g}{cm^3} = 1687\ g$$

Somit ergeben sich für einen Beleimgrad von 10% für die Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und einem Leim : Wasser Verhältnis von 5 : 3,5 (linke Spalte) und mit einem Wasserüberschüss von +15% bezogen auf den Trockengehalt (rechte Spalte) folgende Zusammensetzungen:

Leimbedarf bezogen auf das Atro Gewicht:

$$\frac{1312\ g}{1{,}1} * 0{,}1 = 119{,}3\ g$$

Wasserbedarf:

$$\frac{119{,}3}{5} * 3{,}5 = 83{,}5\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1312\ g + 119{,}3\ g + 83{,}5\ g = 1514{,}8\ g$$

Leimbedarf bezogen auf das Atro Gewicht:

$$\frac{1312\ g}{1{,}1} * 0{,}1 = 119{,}3\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{153{,}3}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}15 = 95{,}8\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1312\ g + 119{,}3\ g + 95{,}8\ g = 1527{,}1\ g$$

Zusammensetzung für Platten mit einem Bleimgrad von 10%, einer Zieldichte von 350 kg/m³ und 30% mehr H_2O:

Leimbedarf ist identisch mit den oben angeführten Platten.

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{119{,}3}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 108{,}5\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1312\ g + 119{,}3\ g + 108{,}5\ g = 1539{,}8\ g$$

Zusammensetzungen für Platten mit einem Beleimgrad von 10%, einer Zieldichte von 450 kg/m³ und 20% mehr H_2O (linke Spalte) und 30% mehr H_2O (rechte Spalte):

Leimbedarf:

$$\frac{1687\ g}{1{,}1} * 0{,}1 = 153\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{153\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}2 = 128{,}5\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1687\ g + 153\ g + 128{,}5\ g = 1968{,}5\ g$$

Leimbedarf:

$$\frac{1687\ g}{1{,}1} * 0{,}1 = 153\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{153\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 139{,}2\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1687\ g + 153\ g + 139{,}2\ g = 1979{,}2\ g$$

Zusammensetzung für die Platte mit einem Beleimgrad von 10% und einer Zieldichte von 250 kg/m³:

Trockenschnitzelbedarf:

$$3750\ cm^3 * 0{,}25\ \frac{g}{cm^3} = \ 937{,}5\ g$$

Leimbedarf:

$$\frac{937{,}5\ g}{1{,}1} * 0{,}1 = 85{,}2\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{85{,}2\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 77{,}5\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$937{,}5\ g + 85{,}2\ g + 77{,}5\ g = 1100{,}2\ g$$

Zusammensetzung der Platten mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und 8% Beleimgrad (linke Spalte) und 6% Beleimgrad (rechte Spalte):

Leimbedarf:

$$\frac{1312\ g}{1{,}1} * 0{,}08 = 95{,}4\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{95{,}4\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 86{,}8\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1312\ g + 95{,}4\ g + 86{,}8\ g = 1494{,}2\ g$$

Leimbedarf:

$$\frac{1312\ g}{1{,}1} * 0{,}06 = 71{,}5\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{71{,}5\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 65\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1312\ g + 71{,}5\ g + 65\ g = 1448{,}5\ g$$

Zusammensetzung der Platten mit einer Zieldichte von 450 kg/m³ und 8% Beleimgrad (linke Spalte) und 6% Beleimgrad (rechte Spalte):

Leimbedarf:

$$\frac{1687\ g}{1{,}1} * 0{,}08 = 122{,}7\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{122{,}7\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 111{,}7\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1687\ g + 112{,}7\ g + 111{,}7\ g = 1911{,}4\ g$$

Leimbedarf:

$$\frac{1687\ g}{1{,}1} * 0{,}06 = 92\ g$$

Wasserbedarf:

$$\left(\frac{92\ g}{5} * 3{,}5\right) * 1{,}3 = 83{,}7\ g$$

Summe der beleimten Trockenschnitzel:

$$1687\ g + 92\ g + 83{,}7\ g = 1862{,}7\ g$$

Die Plattenbezeichnungen sind in Tabelle 15 ersichtlich:

Tabelle 15: Beschriftungen aller hergestellten Platten

Presstemperatur 100°C			Presstemperatur 150°C	
Beleimgrad	350 kg/m³	450 kg/m³	350 kg/m³	450 kg/m³
10%	350 III	450 II	350 V	450 VI
8%	350 IV	450 III	350 VIII	450 VII
6%	350 VI	450 IV	350 VII	450 V

8.4. Brandverhalten

In Abbildung 32 sind sämtliche Ergebnisse des Brandtests der 350/100/8 Platten dargestellt.

Abbildung 32: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten 350/100/8 Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer

In Abbildung 33 sind die vollständigen Ergebnisse des Brandtests der 450/100/8 Platten dargestellt.

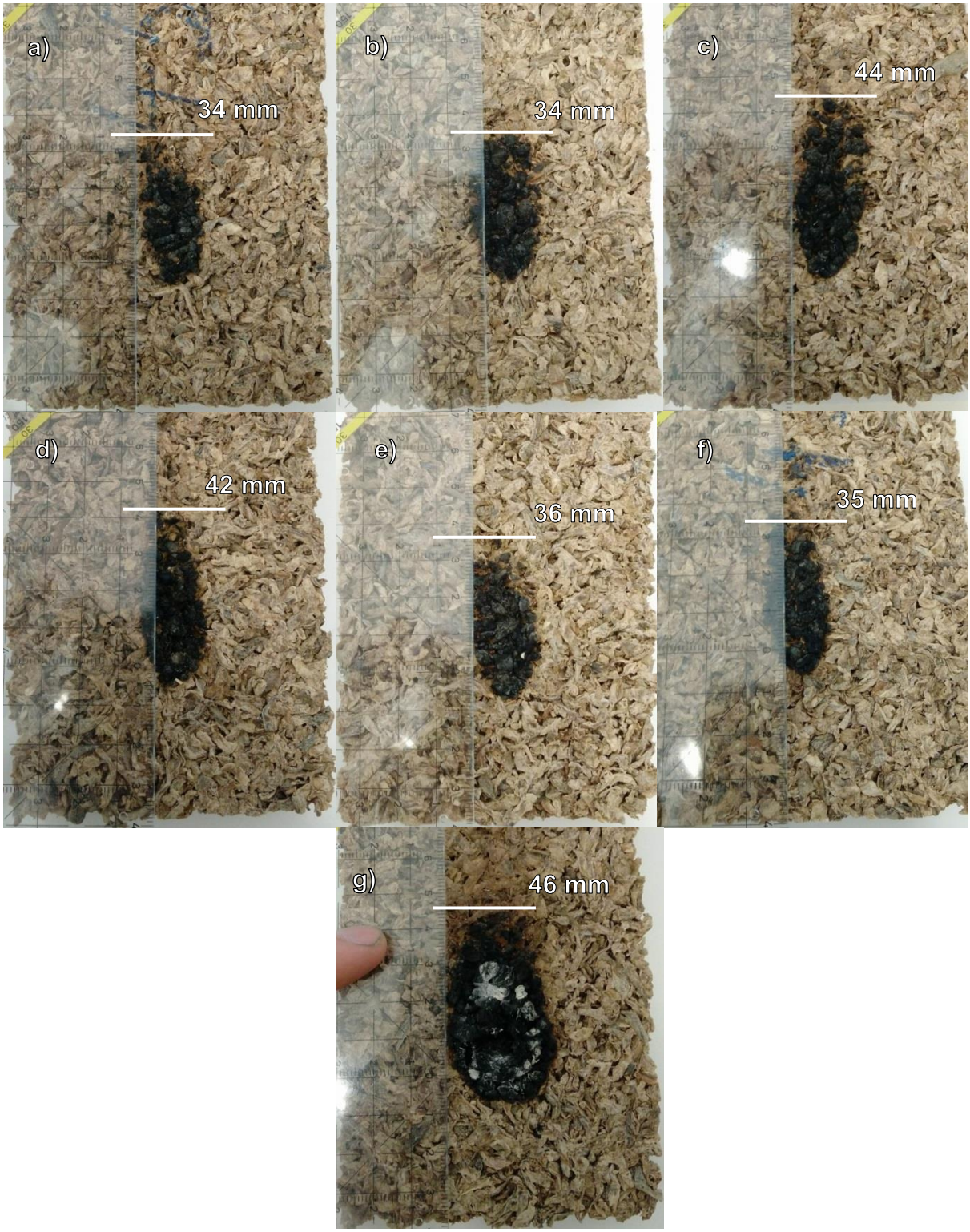

Abbildung 33: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten 450/100/8 Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer

In Abbildung 34 sind die Gesamtergebnisse des Brandtests der Heraklith® Platten dargestellt.

Abbildung 34: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten Heraklith® Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer

8.5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 16 zeigt die Messergebnisse aufgeschlüsselt nach Datum und Probenbezeichnungen.

Tabelle 16: Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsprüfung. „Mess-Temp“ = TKern, „Druck-Mess“ = Messdruck in Pa, „Dicke-Mess“ = Messdicke in mm, „Rohdichte“ = Dichte der Platten in kg/m³, „λ-Mess“ = ermittelte Wärmeleitfähigkeit in mW/mK.

Datum	Versuchs.-Nr.	Probenbez.	Mess-Temp.	Temp.-Diff.	Druck-Mess	Dicke-Mess	Rohdichte	λ-Mess
27.02.2019	20190226a_10	450 / 150°C / 8%	10	10	1000	24,9	472	81,9
27.02.2019	20190226a_25	450 / 150°C / 8%	25	10	1000	24,9	472	87,72
27.02.2019	20190226a_40	450 / 150°C / 8%	40	10	1000	24,9	472	91,17
28.02.2019	20190227a_10	350 / 100°C / 8%	10	15	1000	25,1	371,6	71,93
05.03.2019	20190301a_10	450 / 150°C / 8%	10	15	1000	25,2	468,9	81,11
06.03.2019	20190305a_10	450 / 100°C / 8%	10	15	1000	26,2	464,1	85,38
07.03.2019	20190306a_10	350 / 150°C / 8%	10	15	1000	25,8	364,2	70,92
08.03.2019	20190307a_10	350 / 150°C / 6%	10	15	1000	25	362,3	71,13
11.03.2019	20190308a_10	450 / 150°C / 6%	10	15	1000	26	436,7	80,27

8.6. Drei-Punkt-Biegeversuch

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätmodule aller getesteten Proben dargestellt.

Tabelle 17: Sämtliche charakterisierten Probekörper mit Probennummer, Probenkennung, mechanische Eigenschaften und Abmaße.

	Probenkennung	Festigkeit	E{lo mod}	a{lo 0}	b{lo 0}	W bis F{lo max}
Nr		MPa	GPa	mm	mm	J
165	350_V_1	0,13	0,01154	24,68	130	0,3
166	350_V_2	0,16	0,01492	24,6	130	0,25
167	350_V_3	0,11	0,007766	24,2	129	0,2
168	350_V_4	0,12	0,008784	24,18	129	0,23
169	350_V_5	0,19	0,01554	24,1	129	0,38
170	350_V_6	0,17	0,01588	24,2	134	0,29
98	450_V_1	0,2	0,02287	24,78	130	0,29
99	450_V_2	0,17	0,01633	24,8	130	0,28
100	450_V_3	0,21	0,01906	24,43	130	0,38
101	450_V_4	0,22	0,02375	24,4	130	0,29
107	450_V_5	0,15	0,01062	24,7	130	0,26
110	450_V_6	0,16	0,011	24,59	130	0,31
152	350_III_1	0,16	0,01487	24,92	128	0,27
153	350_III_2	0,17	0,01591	25	129	0,32
154	350_III_3	0,16	0,01142	24,7	129	0,33
155	350_III_4	0,13	0,01415	24,75	130	0,21
157	350_III_5	0,18	0,0176	24,8	130	0,38
158	350_III_6	0,19	0,0125	24,8	130	0,47
159	350_III_7	0,08	0,008612	24,8	130	0,11
160	350_III_8	0,14	0,01004	24,8	130	0,35
161	350_III_9	0,14	0,01167	24,9	130	0,33

	Probenkennung	Festigkeit	E{lo mod}	a{lo 0}	b{lo 0}	W bis F{lo max}
Nr		MPa	GPa	mm	mm	J
162	350_III_10	0,18	0,01189	24,9	130	0,53
163	350_III_11	0,13	0,009408	24,9	130	0,3
164	350_III_12	0,09	0,007557	24,9	130	0,16
115	350_IV_1	0,04	0,003596	24,55	130	0,07
124	350_IV_10	0,05	0,003668	24,45	130	0,09
186	350_IV_11	0,05	0,005072	24,6	132	0,06
187	350_IV_12	0,08	0,006239	24,74	134	0,2
116	350_IV_2	0,05	0,006285	24,55	130	0,07
117	350_IV_3	0,13	0,0102	25	130	0,3
118	350_IV_4	0,11	0,01161	25,24	130	0,16
119	350_IV_5	0,07	0,007348	24,6	130	0,13
120	350_IV_6	0,09	0,006712	24,5	129	0,17
121	350_IV_7	0,07	0,006485	24,7	129	0,13
122	350_IV_8	0,08	0,005421	24,68	129	0,27
123	350_IV_9	0,07	0,004611	24,68	130	0,16
171	350_VI_1	0,04	0,003179	24,9	128	0,06
182	350_VI_10	0,02	0,009098	24,73	129	0,02
183	350_VI_11	0,02	-	24,78	132	0,02
184	350_VI_12	0,05	0,003635	24,78	132	0,1
172	350_VI_2	0,03	0,003558	24,9	130	0,04
174	350_VI_3	0,05	0,004825	24,9	130	0,08
175	350_VI_4	0,05	0,004937	24,85	130	0,08
176	350_VI_5	0,04	0,006191	24,85	130	0,04
178	350_VI_6	0,03	0,003026	24,9	130	0,03
179	350_VI_7	0,04	0,003106	24,9	133	0,12
180	350_VI_8	0,04	0,005593	24,88	130	0,04
181	350_VI_9	0,04	0,002033	24,73	129	0,09
74	350_VII_1	0,05	0,005802	24,7	130	0,07
95	350_VII_2	0,04	0,006483	24,65	130	0,04
96	350_VII_3	0,04	-	24,6	128	0,06
97	350_VII_4	0,02	0,002376	24,55	128	0,03
104	350_VII_5	0,02	-	24,18	119	0,05
106	350_VII_6	0,01	-	24,25	119	0,01
135	450_II_1	0,66	0,04835	25,15	130	1,44
191	450_II_10	0,47	0,03798	25,15	130	0,9
192	450_II_11	0,65	0,04496	25,2	130	1,79
193	450_II_12	0,57	0,04254	25,2	130	1,32
136	450_II_2	0,48	0,0388	25,55	130	1,07
137	450_II_3	0,63	0,04907	25,25	130	1,47
138	450_II_4	0,5	0,0471	25,27	130	0,84
140	450_II_5	0,6	0,05042	25,23	130	1,2
141	450_II_6	0,5	0,04598	25,34	130	1,1
188	450_II_7	0,67	0,06587	25,3	130	1
189	450_II_8	0,68	0,06225	25,4	130	1,14
190	450_II_9	0,57	0,04507	25,25	130	1,01

	Probenkennung	Festigkeit	E{lo mod}	a{lo 0}	b{lo 0}	W bis F{lo max}
Nr		MPa	GPa	mm	mm	J
113	450_III_1	0,15	0,01594	25,25	134	0,27
114	450_III_2	0,16	0,01331	25,3	134	0,36
125	450_III_3	0,42	0,06989	24,69	137	0,31
126	450_III_4	0,45	0,1026	24,35	137	0,23
127	450_III_5	0,2	0,01809	24,9	130	0,34
128	450_III_6	0,19	0,0188	24,8	129	0,29
129	450_III_7	0,23	0,0182	24,8	130	0,51
130	450_III_8	0,3	0,02529	24,95	130	0,71
131	450_III_9	0,2	0,02169	24,84	130	0,3
132	450_III_10	0,25	0,02167	24,8	130	0,54
133	450_III_11	0,24	0,0191	24,75	130	0,58
134	450_III_12	0,32	0,02624	24,89	129	0,65
75	450_IV_1	0,19	0,01432	25,5	129	0,42
149	450_IV_10	0,22	0,01917	25,03	130	0,58
150	450_IV_11	0,18	0,01747	25	130	0,25
151	450_IV_12	0,2	0,01791	25	130	0,32
86	450_IV_2	0,14	0,01433	24,48	131	0,2
87	450_IV_3	0,11	0,01178	25,3	130	0,18
94	450_IV_4	0,21	0,01852	25,2	130	0,49
142	450_IV_5	0,17	0,01701	25	130	0,26
143	450_IV_6	0,2	0,01606	24,95	130	0,42
144	450_IV_7	0,16	0,01518	25,05	130	0,25
145	450_IV_8	0,12	0,0144	25,05	130	0,21
147	450_IV_9	0,24	0,02322	25,05	130	0,47
76	450_VI_1	0,48	0,03497	24,4	130	1,01
77	450_VI_2	0,49	0,03591	24,5	130	1,03
80	450_VI_3	0,58	0,04563	24,1	130	1,24
81	450_VI_4	0,47	0,03886	24,3	130	0,74
82	450_VI_5	0,44	0,0355	24,2	130	0,72
83	450_VI_6	0,49	0,0386	24,25	130	0,97
84	450_VII_1	0,34	0,02323	24,3	130	0,85
85	450_VII_2	0,41	0,02833	25,3	130	0,95
88	450_VII_3	0,29	0,02316	24,3	130	0,56
89	450_VII_4	0,42	0,03381	24,34	130	0,82
90	450_VII_5	0,29	0,02151	24,25	130	0,6
91	450_VII_6	0,48	0,03473	24,25	130	1,22
79	350_VIII_1	0,04	0,004464	24,35	130	0,07
78	350_VIII_2	0,07	0,007168	24,3	130	0,12
92	350_VIII_3	0,08	0,007371	24	129	0,13
93	350_VIII_4	0,1	0,007079	24,1	130	0,26
111	350_VIII_5	0,08	0,003936	24,3	125	0,23
112	350_VIII_6	0,08	0,004271	24,19	129	0,17

	Probenkennung	Festigkeit	E{lo mod}	a{lo 0}	b{lo 0}	W bis F{lo max}
Nr		MPa	GPa	mm	mm	J
194	Heraklith_1	1,53	0,494	21,9	130	0,51
195	Heraklith_2	1,23	0,467	21,7	130	0,32
196	Heraklith_3	0,65	0,2211	21,5	130	0,18
197	Heraklith_4	0,63	0,2085	21,6	130	0,17
198	Heraklith_5	0,93	0,2563	21,4	130	0,31
199	Heraklith_6	0,84	0,2308	21,6	130	0,27
200	Heraklith_7	0,59	0,1825	21,8	130	0,17
201	Heraklith_8	0,43	0,1209	21,8	130	0,14
202	Heraklith_9	0,59	0,1709	22,5	130	0,22
203	Heraklith_10	0,58	0,1655	23,4	130	0,19
204	Heraklith_11	0,53	0,1896	23,4	130	0,14
205	Heraklith_12	0,6	0,1716	23,4	130	0,27

8.7. Statistische Auswertung des Drei-Punkt-Biegeversuchs

8.7.1. Biegefestigkeit

Tabelle 18: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA aller Biegefestigkeiten mit sämtlichen Platten.

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung		(J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall Untergrenze	95%-Konfidenzintervall Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,07167	0,04701	0,947	-0,0876	0,2310
		350/100/6	0,10833	0,04701	0,519	-0,0510	0,2676
		450/100/10	-,43583*	0,04701	0,000	-0,5951	-0,2765
		450/100/8	-0,11333	0,04701	0,445	-0,2726	0,0460
		450/100/6	-0,03250	0,04701	1,000	-0,1918	0,1268
		350/150/10	-0,00083	0,05757	1,000	-0,1959	0,1943
		350/150/8	0,07083	0,05757	0,990	-0,1243	0,2659
		350/150/6	0,11583	0,05757	0,723	-0,0793	0,3109
		450/150/10	-,34583*	0,05757	0,000	-0,5409	-0,1507
		450/150/8	-,22583*	0,05757	0,009	-0,4209	-0,0307
		450/150/6	-0,03917	0,05757	1,000	-0,2343	0,1559
		Heraklith	-,61500*	0,04701	0,000	-0,7743	-0,4557
	350/100/8	350/100/10	-0,07167	0,04701	0,947	-0,2310	0,0876
		350/100/6	0,03667	0,04701	1,000	-0,1226	0,1960
		450/100/10	-,50750*	0,04701	0,000	-0,6668	-0,3482
		450/100/8	-,18500*	0,04701	0,009	-0,3443	-0,0257
		450/100/6	-0,10417	0,04701	0,582	-0,2635	0,0551
		350/150/10	-0,07250	0,05757	0,988	-0,2676	0,1226
		350/150/8	-0,00083	0,05757	1,000	-0,1959	0,1943
		350/150/6	0,04417	0,05757	1,000	-0,1509	0,2393
		450/150/10	-,41750*	0,05757	0,000	-0,6126	-0,2224
		450/150/8	-,29750*	0,05757	0,000	-0,4926	-0,1024
		450/150/6	-0,11083	0,05757	0,777	-0,3059	0,0843
		Heraklith	-,68667*	0,04701	0,000	-0,8460	-0,5274

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung		(J) Probenbezeichnung	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall Untergrenze	95%-Konfidenzintervall Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/6	350/100/10	-0,10833	0,04701	0,519	-0,2676	0,0510
		350/100/8	-0,03667	0,04701	1,000	-0,1960	0,1226
		450/100/10	-,54417*	0,04701	0,000	-0,7035	-0,3849
		450/100/8	-,22167*	0,04701	0,001	-0,3810	-0,0624
		450/100/6	-0,14083	0,04701	0,140	-0,3001	0,0185
		350/150/10	-0,10917	0,05757	0,794	-0,3043	0,0859
		350/150/8	-0,03750	0,05757	1,000	-0,2326	0,1576
		350/150/6	0,00750	0,05757	1,000	-0,1876	0,2026
		450/150/10	-,45417*	0,05757	0,000	-0,6493	-0,2591
		450/150/8	-,33417*	0,05757	0,000	-0,5293	-0,1391
		450/150/6	-0,14750	0,05757	0,346	-0,3426	0,0476
		Heraklith	-,72333*	0,04701	0,000	-0,8826	-0,5640
	450/100/10	350/100/10	,43583*	0,04701	0,000	0,2765	0,5951
		350/100/8	,50750*	0,04701	0,000	0,3482	0,6668
		350/100/6	,54417*	0,04701	0,000	0,3849	0,7035
		450/100/8	,32250*	0,04701	0,000	0,1632	0,4818
		450/100/6	,40333*	0,04701	0,000	0,2440	0,5626
		350/150/10	,43500*	0,05757	0,000	0,2399	0,6301
		350/150/8	,50667*	0,05757	0,000	0,3116	0,7018
		350/150/6	,55167*	0,05757	0,000	0,3566	0,7468
		450/150/10	0,09000	0,05757	0,937	-0,1051	0,2851
		450/150/8	,21000*	0,05757	0,023	0,0149	0,4051
		450/150/6	,39667*	0,05757	0,000	0,2016	0,5918
		Heraklith	-,17917*	0,04701	0,014	-0,3385	-0,0199
	450/100/8	350/100/10	0,11333	0,04701	0,445	-0,0460	0,2726
		350/100/8	,18500*	0,04701	0,009	0,0257	0,3443
		350/100/6	,22167*	0,04701	0,001	0,0624	0,3810
		450/100/10	-,32250*	0,04701	0,000	-0,4818	-0,1632
		450/100/6	0,08083	0,04701	0,882	-0,0785	0,2401
		350/150/10	0,11250	0,05757	0,759	-0,0826	0,3076
		350/150/8	0,18417	0,05757	0,084	-0,0109	0,3793
		350/150/6	,22917*	0,05757	0,008	0,0341	0,4243
		450/150/10	-,23250*	0,05757	0,006	-0,4276	-0,0374
		450/150/8	-0,11250	0,05757	0,759	-0,3076	0,0826
		450/150/6	0,07417	0,05757	0,986	-0,1209	0,2693
		Heraklith	-,50167*	0,04701	0,000	-0,6610	-0,3424
	450/100/6	350/100/10	0,03250	0,04701	1,000	-0,1268	0,1918
		350/100/8	0,10417	0,04701	0,582	-0,0551	0,2635
		350/100/6	0,14083	0,04701	0,140	-0,0185	0,3001
		450/100/10	-,40333*	0,04701	0,000	-0,5626	-0,2440
		450/100/8	-0,08083	0,04701	0,882	-0,2401	0,0785
		350/150/10	0,03167	0,05757	1,000	-0,1634	0,2268
		350/150/8	0,10333	0,05757	0,848	-0,0918	0,2984
		350/150/6	0,14833	0,05757	0,337	-0,0468	0,3434
		450/150/10	-,31333*	0,05757	0,000	-0,5084	-0,1182
		450/150/8	-0,19333	0,05757	0,055	-0,3884	0,0018
		450/150/6	-0,00667	0,05757	1,000	-0,2018	0,1884
		Heraklith	-,58250*	0,04701	0,000	-0,7418	-0,4232

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung		(J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall Untergrenze	95%-Konfidenzintervall Obergrenze
	350/150/10	350/100/10	0,00083	0,05757	1,000	-0,1943	0,1959
		350/100/8	0,07250	0,05757	0,988	-0,1226	0,2676
		350/100/6	0,10917	0,05757	0,794	-0,0859	0,3043
		450/100/10	-,43500*	0,05757	0,000	-0,6301	-0,2399
		450/100/8	-0,11250	0,05757	0,759	-0,3076	0,0826
		450/100/6	-0,03167	0,05757	1,000	-0,2268	0,1634
		350/150/8	0,07167	0,06648	0,997	-0,1536	0,2970
		350/150/6	0,11667	0,06648	0,867	-0,1086	0,3420
		450/150/10	-,34500*	0,06648	0,000	-0,5703	-0,1197
		450/150/8	-0,22500	0,06648	0,051	-0,4503	0,0003
		450/150/6	-0,03833	0,06648	1,000	-0,2636	0,1870
		Heraklith	-,61417*	0,05757	0,000	-0,8093	-0,4191
	350/150/8	350/100/10	-0,07083	0,05757	0,990	-0,2659	0,1243
		350/100/8	0,00083	0,05757	1,000	-0,1943	0,1959
		350/100/6	0,03750	0,05757	1,000	-0,1576	0,2326
		450/100/10	-,50667*	0,05757	0,000	-0,7018	-0,3116
		450/100/8	-0,18417	0,05757	0,084	-0,3793	0,0109
		450/100/6	-0,10333	0,05757	0,848	-0,2984	0,0918
		350/150/10	-0,07167	0,06648	0,997	-0,2970	0,1536
		350/150/6	0,04500	0,06648	1,000	-0,1803	0,2703
		450/150/10	-,41667*	0,06648	0,000	-0,6420	-0,1914
		450/150/8	-,29667*	0,06648	0,001	-0,5220	-0,0714
		450/150/6	-0,11000	0,06648	0,908	-0,3353	0,1153
		Heraklith	-,68583*	0,05757	0,000	-0,8809	-0,4907
	350/150/6	350/100/10	-0,11583	0,05757	0,723	-0,3109	0,0793
		350/100/8	-0,04417	0,05757	1,000	-0,2393	0,1509
		350/100/6	-0,00750	0,05757	1,000	-0,2026	0,1876
		450/100/10	-,55167*	0,05757	0,000	-0,7468	-0,3566
		450/100/8	-,22917*	0,05757	0,008	-0,4243	-0,0341
		450/100/6	-0,14833	0,05757	0,337	-0,3434	0,0468
		350/150/10	-0,11667	0,06648	0,867	-0,3420	0,1086
		350/150/8	-0,04500	0,06648	1,000	-0,2703	0,1803
		450/150/10	-,46167*	0,06648	0,000	-0,6870	-0,2364
		450/150/8	-,34167*	0,06648	0,000	-0,5670	-0,1164
		450/150/6	-0,15500	0,06648	0,500	-0,3803	0,0703
		Heraklith	-,73083*	0,05757	0,000	-0,9259	-0,5357
	450/150/10	350/100/10	,34583*	0,05757	0,000	0,1507	0,5409
		350/100/8	,41750*	0,05757	0,000	0,2224	0,6126
		350/100/6	,45417*	0,05757	0,000	0,2591	0,6493
		450/100/10	-0,09000	0,05757	0,937	-0,2851	0,1051
		450/100/8	,23250*	0,05757	0,006	0,0374	0,4276
		450/100/6	,31333*	0,05757	0,000	0,1182	0,5084
		350/150/10	,34500*	0,06648	0,000	0,1197	0,5703
		350/150/8	,41667*	0,06648	0,000	0,1914	0,6420
		350/150/6	,46167*	0,06648	0,000	0,2364	0,6870
		450/150/8	0,12000	0,06648	0,843	-0,1053	0,3453
		450/150/6	,30667*	0,06648	0,001	0,0814	0,5320
		Heraklith	-,26917*	0,05757	0,001	-0,4643	-0,0741

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: Biegefestigkeit

(I) Probenbezeichnung		(J) Probenbezeichnung	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall Untergrenze	95%-Konfidenzintervall Obergrenze
	450/150/8	350/100/10	,22583*	0,05757	0,009	0,0307	0,4209
		350/100/8	,29750*	0,05757	0,000	0,1024	0,4926
		350/100/6	,33417*	0,05757	0,000	0,1391	0,5293
		450/100/10	-,21000*	0,05757	0,023	-0,4051	-0,0149
		450/100/8	0,11250	0,05757	0,759	-0,0826	0,3076
		450/100/6	0,19333	0,05757	0,055	-0,0018	0,3884
		350/150/10	0,22500	0,06648	0,051	-0,0003	0,4503
		350/150/8	,29667*	0,06648	0,001	0,0714	0,5220
		350/150/6	,34167*	0,06648	0,000	0,1164	0,5670
		450/150/10	-0,12000	0,06648	0,843	-0,3453	0,1053
		450/150/6	0,18667	0,06648	0,214	-0,0386	0,4120
		Heraklith	-,38917*	0,05757	0,000	-0,5843	-0,1941
	450/150/6	350/100/10	0,03917	0,05757	1,000	-0,1559	0,2343
		350/100/8	0,11083	0,05757	0,777	-0,0843	0,3059
		350/100/6	0,14750	0,05757	0,346	-0,0476	0,3426
		450/100/10	-,39667*	0,05757	0,000	-0,5918	-0,2016
		450/100/8	-0,07417	0,05757	0,986	-0,2693	0,1209
		450/100/6	0,00667	0,05757	1,000	-0,1884	0,2018
		350/150/10	0,03833	0,06648	1,000	-0,1870	0,2636
		350/150/8	0,11000	0,06648	0,908	-0,1153	0,3353
		350/150/6	0,15500	0,06648	0,500	-0,0703	0,3803
		450/150/10	-,30667*	0,06648	0,001	-0,5320	-0,0814
		450/150/8	-0,18667	0,06648	0,214	-0,4120	0,0386
		Heraklith	-,57583*	0,05757	0,000	-0,7709	-0,3807
	Heraklith	350/100/10	,61500*	0,04701	0,000	0,4557	0,7743
		350/100/8	,68667*	0,04701	0,000	0,5274	0,8460
		350/100/6	,72333*	0,04701	0,000	0,5640	0,8826
		450/100/10	,17917*	0,04701	0,014	0,0199	0,3385
		450/100/8	,50167*	0,04701	0,000	0,3424	0,6610
		450/100/6	,58250*	0,04701	0,000	0,4232	0,7418
		350/150/10	,61417*	0,05757	0,000	0,4191	0,8093
		350/150/8	,68583*	0,05757	0,000	0,4907	0,8809
		350/150/6	,73083*	0,05757	0,000	0,5357	0,9259
		450/150/10	,26917*	0,05757	0,001	0,0741	0,4643
		450/150/8	,38917*	0,05757	0,000	0,1941	0,5843
		450/150/6	,57583*	0,05757	0,000	0,3807	0,7709

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

8.7.2. Biege-Elastizitätsmodul

Tabelle 19: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA aller Biege-Elastizitätmodule sämtlicher Platten.

Mehrfachvergleiche							
Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
			Mittlere Differenz			95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			(I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	350/100/10	350/100/8	0,00570	0,01621	1,000	-0,0493	0,0607
		350/100/6	0,00766	0,01657	1,000	-0,0486	0,0639
		450/100/10	-0,03606	0,01621	0,576	-0,0910	0,0189
		450/100/8	-0,01877	0,01621	0,994	-0,0737	0,0362
		450/100/6	-0,00448	0,01621	1,000	-0,0595	0,0505
		350/150/10	-0,00027	0,01985	1,000	-0,0676	0,0671
		350/150/8	0,00642	0,01985	1,000	-0,0609	0,0738
		350/150/6	0,00725	0,02563	1,000	-0,0797	0,0942
		450/150/10	-0,02611	0,01985	0,983	-0,0934	0,0412
		450/150/8	-0,01533	0,01985	1,000	-0,0827	0,0520
		450/150/6	-0,00514	0,01985	1,000	-0,0725	0,0622
		Heraklith	-,22776*	0,01621	0,000	-0,2827	-0,1728
	350/100/8	350/100/10	-0,00570	0,01621	1,000	-0,0607	0,0493
		350/100/6	0,00197	0,01657	1,000	-0,0542	0,0582
		450/100/10	-0,04176	0,01621	0,338	-0,0967	0,0132
		450/100/8	-0,02446	0,01621	0,951	-0,0794	0,0305
		450/100/6	-0,01018	0,01621	1,000	-0,0652	0,0448
		350/150/10	-0,00597	0,01985	1,000	-0,0733	0,0614
		350/150/8	0,00072	0,01985	1,000	-0,0666	0,0681
		350/150/6	0,00155	0,02563	1,000	-0,0854	0,0885
		450/150/10	-0,03181	0,01985	0,925	-0,0991	0,0355
		450/150/8	-0,02102	0,01985	0,997	-0,0884	0,0463
		450/150/6	-0,01083	0,01985	1,000	-0,0782	0,0565
		Heraklith	-,23345*	0,01621	0,000	-0,2884	-0,1785
	350/100/6	350/100/10	-0,00766	0,01657	1,000	-0,0639	0,0486
		350/100/8	-0,00197	0,01657	1,000	-0,0582	0,0542
		450/100/10	-0,04373	0,01657	0,302	-0,0999	0,0125
		450/100/8	-0,02643	0,01657	0,928	-0,0826	0,0298
		450/100/6	-0,01214	0,01657	1,000	-0,0684	0,0441
		350/150/10	-0,00793	0,02015	1,000	-0,0763	0,0604
		350/150/8	-0,00124	0,02015	1,000	-0,0696	0,0671
		350/150/6	-0,00042	0,02586	1,000	-0,0881	0,0873
		450/150/10	-0,03377	0,02015	0,900	-0,1021	0,0346
		450/150/8	-0,02299	0,02015	0,995	-0,0913	0,0454
		450/150/6	-0,01280	0,02015	1,000	-0,0811	0,0555
		Heraklith	-,23542*	0,01657	0,000	-0,2916	-0,1792
	450/100/10	350/100/10	0,03606	0,01621	0,576	-0,0189	0,0910
		350/100/8	0,04176	0,01621	0,338	-0,0132	0,0967
		350/100/6	0,04373	0,01657	0,302	-0,0125	0,0999
		450/100/8	0,01730	0,01621	0,997	-0,0377	0,0723
		450/100/6	0,03159	0,01621	0,763	-0,0234	0,0866
		350/150/10	0,03579	0,01985	0,844	-0,0315	0,1031
		350/150/8	0,04248	0,01985	0,636	-0,0249	0,1098
		350/150/6	0,04331	0,02563	0,894	-0,0436	0,1302
		450/150/10	0,00995	0,01985	1,000	-0,0574	0,0773
		450/150/8	0,02074	0,01985	0,998	-0,0466	0,0881
		450/150/6	0,03093	0,01985	0,938	-0,0364	0,0983
		Heraklith	-,19169*	0,01621	0,000	-0,2467	-0,1367

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
			Mittlere Differenz			95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			(I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tukey-HSD	450/100/8	350/100/10	0,01877	0,01621	0,994	-0,0362	0,0737
		350/100/8	0,02446	0,01621	0,951	-0,0305	0,0794
		350/100/6	0,02643	0,01657	0,928	-0,0298	0,0826
		450/100/10	-0,01730	0,01621	0,997	-0,0723	0,0377
		450/100/6	0,01429	0,01621	1,000	-0,0407	0,0693
		350/150/10	0,01850	0,01985	0,999	-0,0488	0,0858
		350/150/8	0,02519	0,01985	0,987	-0,0421	0,0925
		350/150/6	0,02601	0,02563	0,998	-0,0609	0,1129
		450/150/10	-0,00734	0,01985	1,000	-0,0747	0,0600
		450/150/8	0,00344	0,01985	1,000	-0,0639	0,0708
		450/150/6	0,01363	0,01985	1,000	-0,0537	0,0810
		Heraklith	-,20899*	0,01621	0,000	-0,2640	-0,1540
	450/100/6	350/100/10	0,00448	0,01621	1,000	-0,0505	0,0595
		350/100/8	0,01018	0,01621	1,000	-0,0448	0,0652
		350/100/6	0,01214	0,01657	1,000	-0,0441	0,0684
		450/100/10	-0,03159	0,01621	0,763	-0,0866	0,0234
		450/100/8	-0,01429	0,01621	1,000	-0,0693	0,0407
		350/150/10	0,00421	0,01985	1,000	-0,0631	0,0715
		350/150/8	0,01090	0,01985	1,000	-0,0564	0,0782
		350/150/6	0,01173	0,02563	1,000	-0,0752	0,0987
		450/150/10	-0,02163	0,01985	0,997	-0,0890	0,0457
		450/150/8	-0,01085	0,01985	1,000	-0,0782	0,0565
		450/150/6	-0,00066	0,01985	1,000	-0,0680	0,0667
		Heraklith	-,22328*	0,01621	0,000	-0,2783	-0,1683
	350/150/10	350/100/10	0,00027	0,01985	1,000	-0,0671	0,0676
		350/100/8	0,00597	0,01985	1,000	-0,0614	0,0733
		350/100/6	0,00793	0,02015	1,000	-0,0604	0,0763
		450/100/10	-0,03579	0,01985	0,844	-0,1031	0,0315
		450/100/8	-0,01850	0,01985	0,999	-0,0858	0,0488
		450/100/6	-0,00421	0,01985	1,000	-0,0715	0,0631
		350/150/8	0,00669	0,02292	1,000	-0,0711	0,0844
		350/150/6	0,00752	0,02807	1,000	-0,0877	0,1027
		450/150/10	-0,02584	0,02292	0,996	-0,1036	0,0519
		450/150/8	-0,01506	0,02292	1,000	-0,0928	0,0627
		450/150/6	-0,00487	0,02292	1,000	-0,0826	0,0729
		Heraklith	-,22749*	0,01985	0,000	-0,2948	-0,1602
	350/150/8	350/100/10	-0,00642	0,01985	1,000	-0,0738	0,0609
		350/100/8	-0,00072	0,01985	1,000	-0,0681	0,0666
		350/100/6	0,00124	0,02015	1,000	-0,0671	0,0696
		450/100/10	-0,04248	0,01985	0,636	-0,1098	0,0249
		450/100/8	-0,02519	0,01985	0,987	-0,0925	0,0421
		450/100/6	-0,01090	0,01985	1,000	-0,0782	0,0564
		350/150/10	-0,00669	0,02292	1,000	-0,0844	0,0711
		350/150/6	0,00083	0,02807	1,000	-0,0944	0,0961
		450/150/10	-0,03253	0,02292	0,969	-0,1103	0,0452
		450/150/8	-0,02175	0,02292	0,999	-0,0995	0,0560
		450/150/6	-0,01156	0,02292	1,000	-0,0893	0,0662
		Heraklith	-,23418*	0,01985	0,000	-0,3015	-0,1668

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
			Mittlere Differenz			95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			(I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tuckey-HSD	350/150/8	350/100/10	-0,00642	0,01985	1,000	-0,0738	0,0609
		350/100/8	-0,00072	0,01985	1,000	-0,0681	0,0666
		350/100/6	0,00124	0,02015	1,000	-0,0671	0,0696
		450/100/10	-0,04248	0,01985	0,636	-0,1098	0,0249
		450/100/8	-0,02519	0,01985	0,987	-0,0925	0,0421
		450/100/6	-0,01090	0,01985	1,000	-0,0782	0,0564
		350/150/10	-0,00669	0,02292	1,000	-0,0844	0,0711
		350/150/6	0,00083	0,02807	1,000	-0,0944	0,0961
		450/150/10	-0,03253	0,02292	0,969	-0,1103	0,0452
		450/150/8	-0,02175	0,02292	0,999	-0,0995	0,0560
		450/150/6	-0,01156	0,02292	1,000	-0,0893	0,0662
		Heraklith	-,23418*	0,01985	0,000	-0,3015	-0,1668
	350/150/6	350/100/10	-0,00725	0,02563	1,000	-0,0942	0,0797
		350/100/8	-0,00155	0,02563	1,000	-0,0885	0,0854
		350/100/6	0,00042	0,02586	1,000	-0,0873	0,0881
		450/100/10	-0,04331	0,02563	0,894	-0,1302	0,0436
		450/100/8	-0,02601	0,02563	0,998	-0,1129	0,0609
		450/100/6	-0,01173	0,02563	1,000	-0,0987	0,0752
		350/150/10	-0,00752	0,02807	1,000	-0,1027	0,0877
		350/150/8	-0,00083	0,02807	1,000	-0,0961	0,0944
		450/150/10	-0,03336	0,02807	0,993	-0,1286	0,0619
		450/150/8	-0,02257	0,02807	1,000	-0,1178	0,0727
		450/150/6	-0,01238	0,02807	1,000	-0,1076	0,0828
		Heraklith	-,23500*	0,02563	0,000	-0,3219	-0,1481
	450/150/10	350/100/10	0,02611	0,01985	0,983	-0,0412	0,0934
		350/100/8	0,03181	0,01985	0,925	-0,0355	0,0991
		350/100/6	0,03377	0,02015	0,900	-0,0346	0,1021
		450/100/10	-0,00995	0,01985	1,000	-0,0773	0,0574
		450/100/8	0,00734	0,01985	1,000	-0,0600	0,0747
		450/100/6	0,02163	0,01985	0,997	-0,0457	0,0890
		350/150/10	0,02584	0,02292	0,996	-0,0519	0,1036
		350/150/8	0,03253	0,02292	0,969	-0,0452	0,1103
		350/150/6	0,03336	0,02807	0,993	-0,0619	0,1286
		450/150/8	0,01078	0,02292	1,000	-0,0670	0,0885
		450/150/6	0,02097	0,02292	0,999	-0,0568	0,0987
		Heraklith	-,20165*	0,01985	0,000	-0,2690	-0,1343
	450/150/8	350/100/10	0,01533	0,01985	1,000	-0,0520	0,0827
		350/100/8	0,02102	0,01985	0,997	-0,0463	0,0884
		350/100/6	0,02299	0,02015	0,995	-0,0454	0,0913
		450/100/10	-0,02074	0,01985	0,998	-0,0881	0,0466
		450/100/8	-0,00344	0,01985	1,000	-0,0708	0,0639
		450/100/6	0,01085	0,01985	1,000	-0,0565	0,0782
		350/150/10	0,01506	0,02292	1,000	-0,0627	0,0928
		350/150/8	0,02175	0,02292	0,999	-0,0560	0,0995
		350/150/6	0,02257	0,02807	1,000	-0,0727	0,1178
		450/150/10	-0,01078	0,02292	1,000	-0,0885	0,0670
		450/150/6	0,01019	0,02292	1,000	-0,0676	0,0879
		Heraklith	-,21243*	0,01985	0,000	-0,2798	-0,1451

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable:	Elastizitätsmodul						
			Mittlere Differenz			95%-Konfidenzintervall	
(I) Probenname			(I-J)	Standardfehler	Signifikanz	Untergrenze	Obergrenze
Tuckey-HSD	450/150/6	350/100/10	0,00514	0,01985	1,000	-0,0622	0,0725
		350/100/8	0,01083	0,01985	1,000	-0,0565	0,0782
		350/100/6	0,01280	0,02015	1,000	-0,0555	0,0811
		450/100/10	-0,03093	0,01985	0,938	-0,0983	0,0364
		450/100/8	-0,01363	0,01985	1,000	-0,0810	0,0537
		450/100/6	0,00066	0,01985	1,000	-0,0667	0,0680
		350/150/10	0,00487	0,02292	1,000	-0,0729	0,0826
		350/150/8	0,01156	0,02292	1,000	-0,0662	0,0893
		350/150/6	0,01238	0,02807	1,000	-0,0828	0,1076
		450/150/10	-0,02097	0,02292	0,999	-0,0987	0,0568
		450/150/8	-0,01019	0,02292	1,000	-0,0879	0,0676
		Heraklith	-,22262*	0,01985	0,000	-0,2900	-0,1553
	Heraklith	350/100/10	,22776*	0,01621	0,000	0,1728	0,2827
		350/100/8	,23345*	0,01621	0,000	0,1785	0,2884
		350/100/6	,23542*	0,01657	0,000	0,1792	0,2916
		450/100/10	,19169*	0,01621	0,000	0,1367	0,2467
		450/100/8	,20899*	0,01621	0,000	0,1540	0,2640
		450/100/6	,22328*	0,01621	0,000	0,1683	0,2783
		350/150/10	,22749*	0,01985	0,000	0,1602	0,2948
		350/150/8	,23418*	0,01985	0,000	0,1668	0,3015
		350/150/6	,23500*	0,02563	0,000	0,1481	0,3219
		450/150/10	,20165*	0,01985	0,000	0,1343	0,2690
		450/150/8	,21243*	0,01985	0,000	0,1451	0,2798
		450/150/6	,22262*	0,01985	0,000	0,1553	0,2900

*. Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0.05 signifikant.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung von Zuckerrübenschnitzeln (Karaky, et al. 2019). .. 9
Abbildung 2: Siebturm Retsch AS200 mit Sieben von 4 mm bis 0,2 mm Maschenweite. 13
Abbildung 3: Fraktionen der Zuckerrüben - Trockenschnitzel..... 13
Abbildung 4: Rüttelplatte mit Trockenschnitzel 14
Abbildung 5: Unbeleimte (a) und beleimte (b) Trockenschnitzel. 15
Abbildung 6: Beleimte Trockenschnitzel in Pressform (a) und vorgepresst (b)..... 15
Abbildung 7: Zugeschnittene Proben für den Einzelflammtest nach DIN EN ISO 11925-2. Heraklith® - Platte, Zuckerrübenschnitzelplatte mit 350 kg/m³ und Zuckerrübenschnitzelplatte mit 450 kg/m³ (v.l.n.r) 16
Abbildung 8: Versuchsaufbau Einzelflammtest mit montiertem Prüfkörper für die Flächenbeflammung. 17
Abbildung 9: Position des Brenners mit der Lehre zur Einstellung des Brenners für die Flächenbeflammung. 1: Probenoberfläche, 2: Lehre für die Einstellung des Brennerabstandes, 3: Brenner 17
Abbildung 10: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500 20
Abbildung 11: Drei - Punkt Biegeprüfung nach DIN 52186. Auflagerabstand 400 mm. 21
Abbildung 12: Versuchsplanung für die Herstellung der Trockenschnitzelplatten zur mechanischen Charakterisierung. 22
Abbildung 13: Charakteristische Form der Zuckerrübenschnitzel. 23
Abbildung 14: Siebkennlinie der Trockenschnitzel. „D50“ Wert in schwarz, „D6.45“ Wert in Rot dargestellt. 24
Abbildung 15: (a) Trockenschnitzelplatte mit einer Zieldichte von 350 kg/m³ und einer Presstemperatur von 60°C. Deutlich erkennbar, der poröse Randbereich. (b) Rübenschnitzelkuchen mit guter Kaltklebrigkeit. 28
Abbildung 16: (a) Darstellung der Schüsselung einer Platte und die wirkenden Schwindkräfte. (b) Maßnahme zur gleichmäßigen Belüftung um eine Schüsselung der Platte vermeiden zu können. 30
Abbildung 17: Weiße Ablagerungen an der Oberfläche der Zuckerrübenschnitzelplatte mit der Zieldichte 450 kg/m³, 150°C Presstemperatur und 8% Beleimgrad 30
Abbildung 18: (a) Oberseite und (b) Unterseite der 350 kg/m³ dichten Platten..... 31
Abbildung 19: Hochdichte Zuckerrübenschnitzelplatte mit 10% Beleimgrad. 32
Abbildung 20: Abfallende Brandrückstände von der Unterseite einer 350 kg/m³ Platte. Man erkennt eine leichte Verfärbung des Papiers durch Hitzeeinwirkung. ... 33

Abbildung 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Einzelflammtests nach ISO/DIS 11925-2:2018. (a) 350 kg/m³ (b) 450 kg/m³ und (c) Heraklith® als Referenzprobe 34
Abbildung 22: Repräsentative Ergebnisse des verlängerten Einzelflammtests. (a) 350 kg/m³, (b) 450 kg/m³ und (c) Heraklith® als Referenzprobe. 35
Abbildung 23: Losgelöste Ascherückstände während dem 10 minütigen Einzelflammtests bei der 350 kg/m³ Platte. 35
Abbildung 24: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Kerntemperatur von einer Zuckerrübenplatte mit einer Zieldichte von 450 kg/m³, einem Beleimgrad von 8% und der Presstemperatur von 150°C. 36
Abbildung 25: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit zur Dichte mit Schutzfolie und Vergleichsmaterialien. (T_{Kern} = 10°C, ΔT = 15°C bei den ZRS Platten)..... 37
Abbildung 26: Repräsentative Spannungs - Durchbiegungskurven aus dem 3-Punkt Biegeversuch. Es sind nur Ergebnisse der Platten mit 100°C Presstemperatur sowie der Heraklith® - Platte als Referenz angeführt. 37
Abbildung 27: Gegenüberstellung des E-Moduls (oben) und der Biegefestigkeit (unten) der Prüfkörper. 38
Abbildung 28: Box Plots aller Biegefestigkeiten der getesteten Proben im direkten Vergleich. Starke Ausreißer* werden mit einem Stern gekennzeichnet, milde Ausreißer** mit einem Kreis. 39
Abbildung 29: Box Plots aller Biege E-Module der getesteten Proben im direkten Vergleich. Starke Ausreißer* werden mit einem Stern gekennzeichnet, milde Ausreißer** mit einem Kreis. 41
Abbildung 30: Vergleich der Porositäten einer 350/100/8 Platte (a) und 450/100/8 Platte (b). 46
Abbildung 31: Wärmeleitfähigkeit der Zuckerrübenplatten und drei Referenzproben in Abhängigkeit zur Dichte. 46
Abbildung 32: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten 350/100/8 Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer 64
Abbildung 33: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten 450/100/8 Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer 65
Abbildung 34: Ergebnisse der Brandtests aller getesteten Heraklith® Platten. a) - f): 30 Sekunden Testdauer; g): 10 Minuten Testdauer 66

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnis der Siebanalyse. 24
Tabelle 2: Ergebnisse des Einzelflammtests nach 30 Sekunden. 33
Tabelle 3: Mittelwert, Median, Modus, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Biegefestigkeiten aller 450 und 350 kg/m³ Proben mit 100°C Presstemperatur. 40
Tabelle 4: Statistische Auswertungen der Biegeelastizitätmodule aller 450 und 350 kg/m³ Proben mit 100°C Presstemperatur. 41
Tabelle 5: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird die Biegefestigkeit der 350/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern. 47
Tabelle 6: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird die Biegefestigkeit der 450/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern. 48
Tabelle 7: Varianzanalyse der beiden Zieldichten mit den Beleimgraden. 49
Tabelle 8: Varianzanalyse unterschiedlicher Beleimgrade mit den beiden Presstemperaturen. 49
Tabelle 9: Varianzanalyse unterschiedlicher Beleimgrade mit den beiden Zieldichten. 50
Tabelle 10: Post-Hoc-Test nach Tuckey. Verglichen wird der Biege-Elastizitätsmodul der 350/100/10 Platte mit den restlichen Prüfkörpern. 50
Tabelle 11: Varianzanalyse des Biege Elastizitätsmodul mit unterschiedlichem Beleimgrad und Rohdichte. 51
Tabelle 12: Varianzanalyse des Biege-Elastizitätsmodul mit unterschiedlichem Beleimgrad und beiden Zieldichten. 51
Tabelle 13: Varianzanalyse des Biege-Elastizitätsmoduls beider Rohdichten mit unterschiedlichen Presstemperaturen 52
Tabelle 14: Vollständige Auflistung aller Fraktionen der Siebanalyse. 59
Tabelle 15: Beschriftungen aller hergestellten Platten 63
Tabelle 16: Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsprüfung. „Mess-Temp“ = TKern, „Druck-Mess“ = Messdruck in Pa, „Dicke-Mess“ = Messdicke in mm, „Rohdichte“ = Dichte der Platten in kg/m³, „λ-Mess“ = ermittelte Wärmeleitfähigkeit in mW/mK. 67
Tabelle 17: Sämtliche charakterisierten Probekörper mit Probennummer, Probenkennung, mechanische Eigenschaften und Abmaße. 67
Tabelle 18: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA aller Biegefestigkeiten mit sämtlichen Platten. 70
Tabelle 19: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA aller Biege-Elastizitätmodule sämtlicher Platten. 74