

Entwicklung von leichten, dreischichtigen
Sandwichverbundplatten unter Verwendung des Agrarrohstoffes
Mais

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

„Dr. rer. nat.“

der Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie

der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm Ph.D. “Wood Biology and Wood Technology“
der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

Moira P. Burnett-Barking

geboren in Lübbecke/ Nordrhein-Westfalen

Göttingen, August 2016

Betreuungsausschuss

Prof. Dr. A. Kharazipour, Abt. Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, AG Chemie und Verfahrenstechnik für Verbundwerkstoffe, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. C. Mai, Abt. Holzbiologie und Holztechnologie, Burckhardt-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. R. Kraft, Abt. Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, AG Chemie und Verfahrenstechnik für Verbundwerkstoffe, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Mitglieder der Prüfungskommission

Referent: Prof. Dr. A. Kharazipour, Abt. Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, AG Chemie und Verfahrenstechnik für Verbundwerkstoffe, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Korreferent: Prof. Dr. C. Mai, Abt. Holzbiologie und Holztechnologie, Burckhardt-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

Prof. Dr. U. Kües, Abt. Molekulare Holzbiotechnologie und technische Mykologie, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. S. Schütz, Abt. Forstzoologie und Waldschutz, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Jr.-Prof. Dr. K. Zhang, Juniorprofessur Holztechnologie und Holzchemie, Burckhardt-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Dr. M. Euring, Abt. Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, AG Chemie und Verfahrenstechnik für Verbundwerkstoffe, Büsgen-Institut, Georg-August-Universität Göttingen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am BÜSgen-Institut der Georg-August-Universität innerhalb der AG Chemie und Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen unter der Leitung und Betreuung von Herrn Prof. Dr. A. Kharazipour. Unterstützt wurde das Projekt durch eine finanzielle Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über das „Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand“ in Zusammenarbeit mit der TTC Thermofix Technology Center GmbH, Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH sowie durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V..

Ganz herzlich bedanke ich mich bei Herrn Prof. Kharazipour für die Möglichkeit ein sehr interessantes und vielschichtiges Promotionsthema bearbeiten zu dürfen. Ein Dankeschön auch für die über viele Jahre anhaltende freundliche Unterstützung, inspirierenden Gespräche sowie motivierenden und aufbauenden Worte.

Bei Herrn Prof. Dr. C. Mai bedanke ich mich für seine Bereitschaft meine Arbeit als Zweitgutachter zu bewerten.

Herzlich möchte ich mich bei Frau Dr. Nina Ritter für die schönen Jahre im gemeinsamen Büro bedanken. Sie trug wesentlich durch ihre motivierende Unterstützung und der angenehmen Atmosphäre zur Entstehung der vorliegenden Arbeit bei. Vielen Dank für Deine Unterstützung und investierte Freizeit!

Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Chemie und Verfahrenstechnik für Verbundwerkstoffe bedanken. Für die Diskussionen, fachlichen Denkanstöße und zu guter Letzt auch für eine sehr schöne, gemeinsam verbrachte Zeit bedanke ich mich bei Dr. Redelf Kraft, Marc Pauli, Alexander Kirsch, Jan Butschkow, Patrick Reuter, Sebastian Herzog und Patricia Schneider.

Diese Arbeit wäre ohne die konstante Unterstützung meiner Familie und Freunde nicht möglich gewesen. Für die mir geschenkten Möglichkeiten im Leben und das gute Rüstzeug, das mir mitgegeben wurde und für die Fertigstellung dieser Arbeit sehr wichtig war, bedanke ich mich sehr.

Inhalt

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungen und Begriffe.....	VIII
Inhalt	i
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
2 Grundlagen.....	4
2.1 Situation der Holzwerkstoffindustrie	4
2.2 Getreide	5
2.2.1 Die Maispflanze (<i>Zea mays ssp. mays</i>).....	6
2.2.2 Verwendung von Mais	7
2.2.3 Aufbau und Struktur des Polysaccharides Stärke	8
2.3 Leichtbau – Motive	12
2.3.1 Leichtbau in der Holzwerkstoffindustrie bzw. in der Möbelbranche	12
2.3.2 Sandwichverbundplatten und ihr Tragverhalten	15
2.3.3 Bruchverhalten von Sandwichplatten.....	18
3 Material und Methodik.....	20
3.1 Untersuchungsmaterialien.....	20
3.1.1 Popcorngranulat.....	20
3.1.2 Beschichtungsmaterialien	21
3.1.3 Leichtbauplatten zu Referenzzwecken	21
3.1.4 Bindemittel.....	22
3.2 Chemisch-physikalische Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien.....	22
3.2.1 Siebanalyse und Schüttdichte	22
3.2.2 Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität	23
3.2.3 Proteinbestimmung mittels der Kjeldahl-Methode	24
3.2.4 Bestimmung des Formaldehydabsorptionsvermögens	25
3.2.5 Bestimmung der Sorptionseigenschaften	26
3.2.6 Bestimmung der Dimensionsstabilität und Feuchteaufnahme bei definierten Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeiten	26
3.2.7 Bestimmung der Formaldehydemissionen in der Holzwerkstoffindustrie	27
3.3 Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	29

3.3.1	Bestimmung der Rohdichte und des Rohdichteprofiles (DIN EN 323).....	29
3.3.2	Bestimmung der Querkzugfestigkeit (DIN EN 319).....	29
3.3.3	Bestimmung des Schraubenausziehstandes (DIN EN 320)	30
3.3.4	Analytische Evaluierung von Sandwichplatten mittels Biegeprüfung	30
3.4	Herstellung der popcornbasierten Sandwichverbundwerkstoffe im Labormaßstab .	38
3.4.1	Herstellung der Popcornverbundplatten	38
3.4.2	Herstellung und Untersuchung popcornbasierter Sandwichverbundplatten	42
3.5	Herstellung von leichten Sandwichverbundplatten im Industriemaßstab	45
3.5.1	Herstellung der Sandwichverbundplatten	46
4	Statistische Auswertung der Ergebnisse	47
5	Ergebnisse und Diskussion	48
5.1	Chemisch-physikalische Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien.....	48
5.1.1	Schüttdichte und Siebanalyse	48
5.1.2	Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität	52
5.1.3	Bestimmung des Proteingehaltes bzw. Stickstoffgehaltes nach Kjeldahl.....	53
5.1.4	Bestimmung des Formaldehydabsorptionsvermögens	54
5.1.5	Bestimmung der Sorptionseigenschaften	56
5.1.6	Bestimmung der Dimensionsstabilität und Feuchteaufnahme bei definierten Temperaturen und rel. Luftfechtigkeiten	58
5.1.7	Bestimmung der Formaldehydemissionen in der Holzwerkstoffindustrie	61
5.1.8	Bestimmung des Einflusses von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf die Formaldehydabgabe der Verbundplatten.....	65
5.2	Mechanische und physikalische Eigenschaften der popcornbasierten Verbund- sowie Sandwichverbundplatten.....	70
5.2.1	Werkstoffprüfung der Popcornverbundplatten.....	70
5.2.2	Werkstoffprüfung der popcornbasierten Sandwichverbundplatten	79
5.2.3	Bestimmung des Schraubenausziehstandes.....	106
5.2.4	Mechanische und physikalische Eigenschaften der im Industriemaßstab hergestellten Sandwichplatten	111
6	Zusammenfassung	115
7	Ausblick	120
8	Literaturverzeichnis.....	122
9	Normenverzeichnis	133
10	Anhang	135
10.1	Erläuterungen der verwendeten Gleichungen	135
10.2	Rohdichteprofile.....	140
10.3	Bruchmomente	141

ABBLDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: VERKLEISTERUNGSTEMPERATUR FÜR UNTERSCHIEDLICHE GETREIDESORTEN (NACH BRIGGS, 1998).	10
ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT VON PLATTENWERKSTOFFEN UND IHREN ROHDICHTEN (NACH BECKER ET AL., 2004).	14
ABBILDUNG 3: STEIGERUNG DER EFFEKTIVITÄT DURCH EINSATZ DES SANDWICHKONZEPTES; GEWICHT, BIEGEFESTIGKEIT UND STEIFIGKEIT VON SANDWICHMATERIALIEN IM VERGLEICH ZUR MONOLITHISCHEN PLATTE (NACH PETRAS, 1998).	17
ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER SANDWICHPLATTE MIT DEN VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN NACH DIN 53 293.	30
ABBILDUNG 5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER SPANNUNGSVERTEILUNG (OBEN: BIEGESPANNUNG; UNTEN: SCHUBSPANNUNGEN) INNERHALB EINER MONOLITHISCHEN VERBUNDPLATTE SOWIE EINER SANDWICHVERBUNDPLATTE UNTER BIEGEBELASTUNG (NACH KLEIN, 2001; NACH WAGENFÜHR UND WAGENFÜHR, 2008).	32
ABBILDUNG 6: OBEN: DARSTELLUNG DER SCHUB- SOWIE BIEGEVERFORMUNG AN DER GESAMTVERFORMUNG EINER SPANPLATTE, VERURSACHT DURCH BIEGEBELASTUNG IM 3-PUNKT-VERSUCH NACH EN 310. UNTEN: EINFLUSS DER STÜTZWEITE AUF DEN E-MODUL, ERMITTELT NACH EN 310 (NACH EIERLE ET AL. 2008).	34
ABBILDUNG 7: OBEN: DARSTELLUNG DER SCHUB- SOWIE BIEGEVERFORMUNG AN DER GESAMTVERFORMUNG EINER PAPIERWABENPLATTE, VERURSACHT DURCH BIEGEBELASTUNG IM 3-PUNKT-VERSUCH NACH EN 310. UNTEN: EINFLUSS DER STÜTZWEITE AUF DEN E-MODUL, ERMITTELT NACH EN 310 (NACH EIERLE ET AL. 2008).	35
ABBILDUNG 8: GEGENÜBERSTELLUNG DES BRUCHMOMENTS UND DES QUERKRAFTVERLAUFS BEI DER 3- PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG (NACH WAGNER UND ERLHOF, 1991).	36
ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER HERSTELLUNGSVERFAHREN ZUR FERTIGUNG UND EVALUIERUNG DER SANDWICHPLATTEN.	43
ABBILDUNG 10: SCHEMATISCHEN DARSTELLUNG EINER SANDVIK DOPPELBANDPRESSENEINHEIT MIT HEIZ-, AUSHÄRTUNGS- SOWIE KÜHLZONE (SANDVIK, 2016).	46
ABBILDUNG 11: FRAKTIONSGRÖßENVERTEILUNG DES BICHSEL- SOWIE MIKROWELLEN-POPCORNS (GESIEBT UND OHNE FEINANTEIL).	50
ABBILDUNG 12: FRAKTIONSGRÖßENVERTEILUNG DER DECK- BZW. MITTELSCHICHTSPÄNE (FICHTE). .	52
ABBILDUNG 13: FORMALDEHYDAUFNAHMEFÄHIGKEIT VON BICHSEL-POPCORN NACH 1 H, 2 H SOWIE 3 H BEI UNTERSCHIEDLICHEN TEMPERATUREN.	55
ABBILDUNG 14: ADSORPTIONSVERHALTEN VON POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM), POPCORNGRANULAT SOWIE HOLZSPÄNEN BEI 20 °C UND VARIIERENDEN REL. LUFTFEUCHTIGKEITEN (ADSORPTION VON 25 % BIS 85 % REL. LUFTFEUCHTE).	57
ABBILDUNG 15: SORPTIONSVERHALTEN DER POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUREN (30 °C BZW. 35 °C), REL. LUFTFEUCHTEN (80 %, 82 % SOWIE 85 %) UND DEFINIERTEN ZEITEINHEITEN.	59
ABBILDUNG 16: LÄNGENÄNDERUNG VON POPCORNBASIERTE VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ , DICKE 20 MM) IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR (35 °C) UND VARIIERENDEN LUFTFEUCHTEN (75 % BIS 85 %) NACH 24 H, 48 H, 72 H SOWIE 96 H.	61
ABBILDUNG 17: FORMALDEHYDEMISSIONEN NACH DER KAMMERMETHODE VON UF-HARZ (K 350) GEBUNDENEN POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) MIT BINDEMTELANTEILEN VON 4 %, 6 % SOWIE 8 %.	63

ABBILDUNG 18: FORMALDEHYDEMISSIONEN NACH DER KAMMERMETHODE VON UF-HARZ (K 340) GEBUNDENEN POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) MIT BINDEMITELANTEILEN VON 4 %, 6 % SOWIE 8 %.	64
ABBILDUNG 19: FORMALDEHYDABGABE VON POPCORNBASIERTEN, UF-HARZ GEBUNDENEN VERBUNDPLATTEN (K 350; ROHDICHTE 300 KG/M ³ , DICKE 20 MM) ERMITTELT NACH EINER MODIFIZIERTEN AUSFÜHRUNG DER EN 717-3 BEI DEFINIERTEN TEMPERATUREN (OBEN: 30 °C UND UNTEN: 40 °C), REL. LUFTFEUCHTIGKEITEN (RH: 35 %, 75 %, 85 %, 100 %) UND ZEITSPANNEN (24 H, 48 H BZW. 96 H). BINDEMITELANTEIL: FESTHARZ 8 % BEZ. AUF ATRO POPCORN MATERIAL (VGL. KAP. 3.2.7.3 VERSUCHSREIHE IV).	68
ABBILDUNG 20: QUERZUGFESTIGKEITEN DER VERBUNDPLATTEN (VGL. KAP. 3.4.1, VERSUCHSREIHE I) AUS UNTERSCHIEDLICH FRAKTIONIERTEM BICHEL- BZW. MIKROWELLEN-POPCORN IN DEN ROHDICHTEN 200 KG/M ³ UND 300 KG/M ³ .	71
ABBILDUNG 21: MITTLERE QUERZUGFESTIGKEITEN VON UF-HARZ (K 350) GEBUNDENEN POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) IN ABHÄNGIGKEIT DEFINIERTER PRESSPARAMETER (PRESSTEMPERATUR: 140 °C BIS 200 °C; PRESSEZEITFAKTOR: 7,5 S/MM BIS 12,0 S/MM).	72
ABBILDUNG 22: MITTLERE QUERZUGFESTIGKEIT DER POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) IN ABHÄNGIGKEIT EINER UNTERSUCHTEN PRESSEZEITSPANNE VON 4,5 S/MM BIS 10,5 S/MM, DEN VERWENDETEN UF-HARZEN K 340 BZW. K 350 SOWIE EINER PRESSTEMPERATUR VON 180 °C.	73
ABBILDUNG 23: QUERZUGFESTIGKEIT DER POPCORNVERBUNDPLATTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER ROHDICHTE; KORRELATIONSANALYSE NACH SPEARMAN R ² = 0,91. DEFINIERTE PRESSPARAMETER: PRESSTEMPERATUR 180 °C UND PRESSEZEITFAKTOR 10,5 S/MM.	75
ABBILDUNG 24: MITTLERE QUERZUGFESTIGKEITEN VON POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ BZW. 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) UNTER VERWENDUNG DER UF-BASIERTEN BINDEMITELE K 340 SOWIE K 350 MIT BELEIMUNGSANTEILEN VON 4 %, 6 % UND 8 % (BEZ. FESTHARZ AUF ATRO POPCORN).	76
ABBILDUNG 25: MITTLERE QUERZUGFESTIGKEIT DER MIT MDI GEBUNDENEN VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 250 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) SOWIE UF-HARZ GEBUNDENE REFERENZVERBUNDPLATTEN MIT BINDEMITELANTEILEN VON 8 % BZW. 6 % (FESTHARZ BEZ. AUF ATRO POPCORN).	78
ABBILDUNG 26: BRUCHMOMENTE DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ , 400 KG/M ³ , 450 KG/M ³ ; PLATTENDICKE 20 MM). DIE SANDWICHVERBUNDE BESTEHEN AUS EINEM POPCORNVERBUND (60 GEW.-%) SOWIE DECKSCHICHTEN (40 GEW.-%) AUS HOLZSPÄNEN BZW. HOLZFASERN. VERWENDETES BINDEMITELESYSTEM: K 350. ZUM VERGLEICH BRUCHMOMENTE VON REFERENZSPANPLATTEN MIT DEN ROHDICHTEN 500 KG/M ³ SOWIE 650 KG/M ³ .	80
ABBILDUNG 27: BRUCHMOMENTE DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICH-VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ BZW. 400 KG/M ³ ; PLATTENDICKE 20 MM BZW. 30 MM). SANDWICHVERBUNDE BESTEHEN AUS EINEM POPCORNVERBUND (60 GEW.-%) SOWIE DECKSCHICHTEN (40 GEW.-%) AUS HOLZFASERN; VERWENDETE BINDEMITELESYSTEME: K 340 BZW. K 350.	83
ABBILDUNG 28: BRUCHMOMENTE DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICH-VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ BZW. 400 KG/M ³ ; PLATTENDICKE 20 MM BZW. 30 MM). SANDWICHVERBUNDE BESTEHEN AUS EINEM POPCORNVERBUND (60 GEW.-%) SOWIE DECKSCHICHTEN (40 GEW.-%) AUS HOLZFASERN; VERWENDETE BINDEMITELESYSTEME K 340 + PMDI BZW. K 350 + PMDI.	83
ABBILDUNG 29: BRUCHMOMENTE DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ BZW. 400 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) MIT	

VARIIERENDEN DECKSCHICHT- UND MITTELSCHICHTANTEILEN (40 %, 50 % SOWIE 60 % DECKSCHICHTANTEILE); VERGLEICH MIT REFERENZSPANPLATTEN (ROHDICHTE 500 KG/M ³ (DUNKELBLAU) BZW. 650 KG/M ³ (HELLBLAU)).	86
ABBILDUNG 30: BRUCHMOMENTE ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG AN FASER-SANDWICHPLATTEN (300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) SOWIE ZU VERGLEICHSZWECKEN AN REFERENZSPANPLATTEN (650 KG/M ³ ; DICKE 19 MM).	88
ABBILDUNG 31: DURCH 3-PUNKT-BIEGUNG ERMITTELTE BRUCHMOMENTE DER IM ZWEISCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHPLATTEN (ROHDICHTE DER POPCORNVERBUNDPLATTEN 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) MIT DEN VERWENDETEN DECKSCHICHTMATERIALIEN BUCHEN- BZW. PAPPEL-SPERRHOLZ, HPL, ALUMINIUM, DÜNN-SPANPLATTE SOWIE DÜNN-MDF; BRUCHMOMENTE VON REFERENZSPANPLATTEN DES TYP S P2 (ROHDICHTE 660 KG/M ³ ; DICKE 19 MM SOWIE ROHDICHTE 600 KG/M ³ ; DICKE: 25 MM).	91
ABBILDUNG 32: LINKS OBEN: ALUMINIUM-SANDWICHPLATTE MIT LOKALER INTRUSION; LINKS UNTEN: DECKSCHICHTVERSAGEN AN HPL-SANDWICHPLATTE; RECHTS OBEN: SCHUBBRUCH AN SPERRHOLZBESCHICHTETER SANDWICHPLATTE; RECHTS UNTEN: NORMALER BIEGEBRUCH AN FASER-SANDWICHPLATTE.	92
ABBILDUNG 33: BRUCHMOMENTE DER SANDWICHPLATTEN AUS POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 200 KG/M ³ UND 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) UND UNTERSCHIEDLICHEN DECKSCHICHTEN (DS) ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG (VERSUCHSREIHE VIII.A).	93
ABBILDUNG 34: BRUCHMOMENTE DER HPL BESCHICHTETEN SANDWICHPLATTEN (ROHDICHTE DER VERBUNDPLATTE 200 KG/M ³) GEPRÜFT NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG.	99
ABBILDUNG 35: VERGLEICH VON MOMENTEN- UND QUERKRÄFTEVERLAUF WÄHREND DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG ANHAND EINES BEISPIELS AN EINER VERBUNDPLATTE (DICKE 20 MM) (NACH SCHNEIDER, 1986).	100
ABBILDUNG 36: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PARTIALDURCHSENKUNG (NACH KLEIN, 2011).	103
ABBILDUNG 37: SCHRAUBENAUSZIEHWIDERSTAND AUS DER OBERFLÄCHE UND DEN SEITENFLÄCHEN DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM).	107
ABBILDUNG 38: SCHRAUBENAUSZIEHWIDERSTAND AUS DER OBERFLÄCHE UND DEN SEITENFLÄCHEN DER IM ZWEISCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHPLATTEN (POPCORNVERBUNDPLATTE 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM).	109
ABBILDUNG 39: SCHRAUBENAUSZIEHWIDERSTAND AUS OBERFLÄCHE UND SEITENFLÄCHE VON AUSGEWÄHLTEN INDUSTRIEPLATTEN: PAPIERWABENPLATTE, BALANCEBOARD, TISCHLERPLATTE UND SPANPLATTE.	110
ABBILDUNG 40: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VERFORMUNG (F_s) UND DER WINKELÄNDERUNG (γ) VERURSACHT DURCH 3-PUNKT-BIEGUNG (NACH KLEIN 2011).	139
ABBILDUNG 41: ROHDICHTEPROFIL EINER SANDWICHVERBUNDPLATTE HERGESTELLT IM EINSCHRITTVERFAHREN. DIE SANDWICHVERBUNDPLATTE BESTEHT AUS EINEM POPCORNVERBUND (60 GEW.-%) SOWIE DECKSCHICHTEN (40 GEW.-%) AUS HOLZSPÄNEN. VGL. KAP. 3.4.2, VERSUCHSREIHE V SOWIE KAP. 5.2.2.1.1, TAB. 26.	140
ABBILDUNG 42: ROHDICHTEPROFIL EINER SANDWICHVERBUNDPLATTE HERGESTELLT IM EINSCHRITTVERFAHREN. DIE SANDWICHVERBUNDPLATTE BESTEHT AUS EINEM POPCORNVERBUND (60 GEW.-%) SOWIE DECKSCHICHTEN (40 GEW.-%) AUS HOLZFASERN. VGL. KAP. 3.4.2, VERSUCHSREIHE V SOWIE KAP. 5.2.2.1.1, TAB. 26.	141

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1:	CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER HÄUFIGSTEN GETREIDESORTEN (KLINGLER, 1995) .	6
TABELLE 2:	VERWENDUNG VON AGRARPFLANZEN ZUR STÄRKEPRODUKTION IM JAHR 2010 (VDGS, 2015)	8
TABELLE 3:	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN DECKSCHICHTMATERIALIEN ZUR FERTIGUNG DER SANDWICHPLATTEN	21
TABELLE 4:	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN LEICHTBAUPLATTEN ZU REFERENZZWECKEN (NACH PFLEIDERER, 2015)	21
TABELLE 5:	ÜBERSICHT ÜBER DIE VERWENDETEN MATERIALIEN UND DEREN FRAKTIONIERUNG	23
TABELLE 6:	PARAMETER ZUR ÜBERPRÜFUNG DER DIMENSIONSSTABILITÄT DER VERBUNDPLATTEN BEI DEFINIERTEN TEMPERATUREN (°C) BZW. REL. LUFTFEUCHTEN (%)	27
TABELLE 7:	PRÜFFPARAMETER WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DER KAMMERMETHODE (DIN EN 717-1)	27
TABELLE 8:	PARAMETER ZUR BESTIMMUNG DER FORMALDEHYDABGABE	29
TABELLE 9:	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN	31
TABELLE 10:	ERFASSTE UND ABGELEITETE PARAMETER NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG	37
TABELLE 11:	ÜBERSICHT DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHSREIHEN ZUR OPTIMIERUNG DER POPCORNVERBUNDPLATTEN	40
TABELLE 12:	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER PRESSPARAMETER AUF DIE QUERZUGFESTIGKEIT VON UF-HARZ (K 350 BZW. K 340) GEBUNDENEN POPCORNVERBUNDPLATTEN	41
TABELLE 13:	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN BELEIMUNGS- SOWIE PRESSPARAMETER ZUR HERSTELLUNG DER SANDWICHPLATTEN IM EINSCHRITT-VERFAHREN	42
TABELLE 14:	ÜBERSICHT DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHSREIHEN ZUR BEURTEILUNG DER IM EINSCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHPLATTEN	44
TABELLE 15:	ÜBERSICHT DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHSREIHEN ZUR BEURTEILUNG DER IM ZWEISCHRITT-VERFAHREN HERGESTELLTEN SANDWICHPLATTEN	45
TABELLE 16:	ÜBERSICHT DER DURCHGEFÜHRTEN PRÜFUNGEN AN DEN SANDWICHPLATTEN	45
TABELLE 17:	SCHÜTTDICHTEN DER UNTERSCHIEDLICHEN POPCORN GRANULATE SOWIE ZU VERGLEICHSZWECKEN VON FICHTENSÄNEN	49
TABELLE 18:	PH-WERT SOWIE PUFFERKAPAZITÄT NACH DER KALTWASSEREXTRAKTION DER MATERIALIEN POPCORN SOWIE FICHTENSÄNE	53
TABELLE 19:	PROTEIN- UND STICKSTOFFGEHALT VON BICHSEL- BZW. MIKROWELLEN-POPCORN SOWIE VON MAISKÖRNERN UND FICHTENHOLZSPÄNEN NACH DER KJELDAHL-METHODE	53
TABELLE 20:	EFFEKT VON TEMPERATUR UND REL. LUFTFEUCHTIGKEIT NACH 96 H AUF DIE LÄNGEN, BREITEN SOWIE DICKEN DER POPCORN BASIERTEN VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM)	60
TABELLE 21:	FORMALDEHYDEMISSIONEN VON POPCORN BASIERTEN VERBUNDPLATTEN (ROHDICHTEN 200 KG/M ³ BZW. 300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM BZW. 30 MM) NACH DIN EN 717-2; GRENZWERT FÜR BESCHICHTETE SPANPLATTEN BZW. SPERRHÖLZER 3,5 MG/H*M ² BZW. 5,0 MG/H*M ²	65
TABELLE 22:	FORMALDEHYDABGABE (MG/1000 G MATERIAL) VON POPCORN BASIERTEN, UF-HARZ GEBUNDENEN VERBUNDPLATTEN (300 KG/M ³ ; DICKE 20 MM) ERMITTELT NACH EINER MODIFIZIERTEN AUSFÜHRUNG DER EN 717-3 BEI DEFINIERTEN TEMPERATUREN (30 °C, 40 °C), REL.	

LUFTFEUCHTIGKEITEN (RH: 35 %, 75 %, 85 %, 100 %) UND ZEITEN (24 H, 48 H, 96 H). BINDEMITTELANTEIL: FESTHARZ 8 % BEZ. AUF ATRO POPCORN MATERIAL (VGL. KAP. 3.2.7.3 VERSUCHSREIHE IV)	66
TABELLE 23: ÜBERSICHT DER ERMITTELTEN BRUCHMOMENTE NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT- BIEGEPRÜFUNG AN FASER-SANDWICHPLATTEN IN DEN ROHDICHTEN VON 300 KG/M ³ UND 400 KG/M ³ SOWIE ZU VERGLEICHSZWECKEN AN KONVENTIONELL HERGESTELLTEN SPANPLATTEN (650 KG/M ³)	89
TABELLE 24: KENNDATEN DER VERWENDETEN DECKSCHICHTMATERIALIEN	90
TABELLE 25: BRUCHMOMENTE DER SANDWICHPLATTEN AUS POPCORNVERBUNDPLATTEN (ROHDICHTE DER POPCORNVERBUNDPLATTEN 200 KG/M ³ BZW. 300 KG/M ³) UND UNTERSCHIEDLICHEN DECKSCHICHTEN (DS) ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG (VERSUCHSREIHE VIII.B).....	94
TABELLE 26: BRUCHMOMENTE VON INDUSTRIELL GEFERTIGTEN LEICHTBAUPLATTEN SOWIE SPANPLATTEN ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG (ANGABE DER STANDARDABWEICHUNG VGL. KAP. 10.3, TAB. 36)	96
TABELLE 27: DURCHBIEGUNGSAKTIVITÄTEN VON SANDWICHPLATTEN, SPANPLATTEN SOWIE BALANCEBOARDS ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT- SOWIE 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG	102
TABELLE 28: VERGLEICH DER ERZIELTEN QUERZUGFESTIGKEITEN DER IM LABORMAßSTAB BZW. INDUSTRIEMAßSTAB HERGESTELLTEN POPCORNVERBUND- BZW. SANDWICHVERBUNDPLATTEN	112
TABELLE 29: ERMITTELTE BRUCHMOMENTE SOWIE QUERZUGFESTIGKEITEN DER IM INDUSTRIEMAßSTAB HERGESTELLTEN POPCORNVERBUND- BZW. SANDWICHVERBUNDPLATTEN; DS = DECKSCHICHT	113
TABELLE 30: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DER BIEGESPANNUNGEN NACH EN 310 FÜR MONOLITHISCHE PLATTENWERKSTOFFE.....	135
TABELLE 31: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DES ELASTIZITÄTSMODULS NACH EN 310 FÜR MONOLITHISCHE PLATTENWERKSTOFFE.....	135
TABELLE 32: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DER BRUCHMOMENTE NACH EN 310 FÜR MONOLITHISCHE PLATTENWERKSTOFFE SOWIE NACH DIN 53 293 FÜR SANDWICHVERBUNDWERKSTOFFE	136
TABELLE 33: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DES WIDERSTANDSMOMENTS EINER SANDWICHPLATTE	137
TABELLE 34: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DER BIEGEVERFORMUNG VERURSACHT DURCH 3-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG	138
TABELLE 35: GRUNDBEDINGUNGEN ZUR HERLEITUNG DER SCHUBVERFORMUNG VERURSACHT DURCH 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT-BIEGEPRÜFUNG	139
TABELLE 36: BRUCHMOMENTE UND STANDARDABWEICHUNGEN VON INDUSTRIELL GEFERTIGTEN LEICHTBAUPLATTEN SOWIE SPANPLATTEN ERMITTELT NACH DER 3-PUNKT- BZW. 4-PUNKT- BIEGEPRÜFUNG	141

Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche	[mm ²]
a	Kraftarm	[mm]
atro	absolut trocken	[-]
b	Plattenbreite	[mm]
c	Kernschichtdicke	[mm]
d	Abstand zwischen den Schwerpunkten der Deckschicht	[mm]
d ₁	Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Deckschicht und dem Gesamtschwerpunkt der Platte	[mm]
DIN	Deutsches Institut für Normung	[-]
DMK	Deutsches Maiskomitee	[-]
E _D	E-Modul Deckschicht	[Nmm ⁻²]
E _K	E-Modul Kernlage	[Nmm ⁻²]
EN	Europäische Normung	[-]
F _{max}	Maximalkraft, die zum Versagen führt	[N]
f	Durchbiegung	[mm]
G	Schubmodul	[N/mm ²]
h	Plattendicke	[mm]
I	Flächenträgheitsmoment	[m ⁴]
l ₁	Stützweitenabstand	[mm]
lutro	lufttrocken	[-]
M	Bruch- bzw. Biegemoment	[Nmm]
o. J.	ohne Jahr	[-]
P	Auflagerkraft	[N]
RH	Relative Humidity/ relative Luftfeuchte	[%]
S _{eff}	Effektive Schubsteifigkeit	[N]
t	Deckschichtdicke	[mm]
UF	Urea-Formaldehyd	[-]
VDGS	Verband der deutschen Getreideverarbeiter und Stärkehersteller e. V.	[-]
W	Widerstandsmoment	[m ³]
γ	Gleitung bzw. Winkeländerung	[°]
σ oder f _m	Biegespannungen	[Nmm ⁻²]

σ_d, σ_z	Druck- bzw. Zugspannungen	[Nmm ⁻²]
τ_k	Schubspannungen im Kern	[Nmm ⁻²]
ω	Verformung	[mm]
Q	Querkräfte	[N]
z	Abstand des Randes zur Faser	[mm]

1 Einleitung

Die Entwicklung von Holzwerkstoffen, wie bspw. Faserplatten, Spanplatten und anderen Werkstoffen, beruht auf der Intention die Effizienz der Holznutzung zu erhöhen sowie die Holznutzung auf weitere Anwendungsmöglichkeiten auszuweiten, sodass innerhalb dieses Bereiches viele Spezialplatten gefertigt werden (NIEMZ und WAGENFÜHR, 2008). Innerhalb der Holzwerkstoffindustrie und der Möbelbranche kommt der Spanplatte eine besonders wichtige Rolle zu. Die Spanplatte hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem vielseitigen Produkt entwickelt in dem verschiedene Ressourcen – insbesondere Holz – effizient eingesetzt werden. Um eine ressourcenschonende Verwendung der Rohstoffe zu gewährleisten, greift die Holzwerkstoffindustrie neben frischem Industrieholz auch auf Nebenprodukte aus der Sägeindustrie sowie Altholz zurück (MANTAU, 2012).

In den letzten Jahren ist es auf Grund von verschiedenen Faktoren zu einer Konkurrenzsituation zwischen den Holzabnehmern der Holzwerkstoffindustrie und des Energiesektors gekommen (WEIMAR et al., 2012). Ausschlaggebend für die Zuspitzung dieser Rohstoffsituation ist die politische Förderung der Biomassennutzung durch Marktanzreizprogramme sowie bis vor einigen Jahren ein kontinuierlicher Preisanstieg der fossilen Rohstoffe. Mit diesen Programmen wurden Ziele verfolgt, vermehrt auf fossile Energieträger zu verzichten und gleichzeitig einen positiven Beitrag für das Klima zu leisten (WEIMAR et al., 2012; BMWI, 2016). Jedoch hat sich gezeigt, dass durch diese Fördermaßnahmen die Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke stark angestiegen ist und in den letzten Jahren einen enormen Einfluss auf den Holzmarkt und damit einhergehend auf die Holzverarbeitende Industrien ausgeübt haben. Diese Strategie führte dazu, dass vermehrt Holz für energetische Zwecke im privaten als auch industriellen Maßstab eingesetzt wurde. Dies hat ferner dazu beigetragen, dass bereits 2010 mehr Holz verbrannt als stofflich genutzt wurde und, dass der Holzmarkt sowie die Holznachfrage sehr stark von den Energiepreisen und energiepolitischen Entscheidungen beeinflusst wurden (MANTAU, 2012).

Doch nicht allein die verstärkte Verwendung des Holzes für energetischen Zwecke ist für die problematische Rohstoffsituation verantwortlich. Auf Grund von Waldumbaumaßnahmen zur Bildung zukunftsfähiger und stabiler Mischwälder, die dem Klimawandel besser standhalten sollen, ist das für die Holzwerkstoffindustrie so wichtige Nadelholzvorkommen (Fichte, Kiefer) zurückgegangen. So ist in den Jahren von 2002 bis 2012 die mit Fichte und Kiefer bewaldete Fläche um etwa 8 % bzw. 3 % zurückgegangen. Der Waldumbau stellt die Holzwerkstoffindustrie vor neue Herausforderungen, da bisher die Forst- und Holzwirtschaft hauptsächlich auf die Nadelholzbaumarten Fichte und Kiefer ausgelegt ist (BWI-3, 2014). Mit Blick auf den Klimawandel

wird jedoch eine Umstrukturierung der heimischen Wälder hin zu biodiversen Mischwäldern mit erhöhten Anteilen an Laubbäumen, wobei die heimische Buche (*Fagus sylvatica L.*) die Hauptbaumart darstellen soll, verfolgt. Hierbei soll der Laubbaumanteil auf bis zu 65 % gesteigert werden. Weiterhin wird angestrebt, dass die für die Holzwerkstoffindustrie so wichtigen Nadelhölzer nur als Begleitbaumarten auftreten werden (HAPLA und MILITZ, 2008; POLLE et al., 2008). Es müssen folglich neue Konzepte entwickelt werden, um das sich verändernde Holzaufkommen effizient nutzen zu können.

Die knapper und teurer werdenden Rohstoffe waren und sind Auslöser für ein breites Umdenken und der aktiven Suche nach alternativen Möglichkeiten zum Allrounder Spanplatte. Doch werden nicht nur auf Grund der Rohstoffproblematik Alternativen zur Spanplatte gefordert, sondern auch, weil sich das Konsumverhalten der Konsumenten gewandelt hat. Innerhalb der Gesellschaft hat sich ein Trend zu mehr Mobilität und Flexibilität vollzogen, hierauf hat der Möbelsektor in Form von flexiblen Möbel, die umzugskompatibel und deutlich leichter zu handhaben sind, reagiert. Für eine Verbesserung der Handhabung eines Möbelstücks ist das Gewicht der ausschlaggebende Faktor. Innerhalb des Möbelsektors hat sich ein starker Wandel vollzogen, d. h. der Möbelmitnahmebereich hat sich zu einem wichtigen Wirtschaftszweig entwickelt. Daher werden von Seiten der Möbelindustrie vermehrt leichte Plattenprodukte verwendet und deren Entwicklung begrüßt (POPPENSIEKER und THÖMEN, 2005).

1.1 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der dargestellten Veränderungen hinsichtlich der sich zuspitzenden Rohstoffversorgung, der betriebenen Klimapolitik sowie des sich verändernden Möbelmarkts besteht die Notwendigkeit alternative Strategien zu entwickeln, um neue Rohstoffquellen für die Herstellung von Holzwerkstoffen zu erschließen und in die Produktion bestehender oder neuer Produkte zu integrieren. Die Anwendung von verschiedenen Leichtbaustrategien scheint neue Möglichkeiten zu eröffnen, um dieser Problematik zu begegnen. Nach WIEDEMANN (2006) werden Leichtbauprodukte oder -konstruktionen aus politischen, ökonomischen oder funktionellen Gründen verwendet, um das Gewicht einer Konstruktion zu reduzieren ohne jedoch die Stabilität oder Funktion des Ganzen zu gefährden. Gewichtsreduzierungen durch Anwendung neuer Konstruktionsprinzipien oder durch Substituierung schwerer Materialien durch leichtere scheinen neue vielfältige Möglichkeiten für die Werkstoffherstellung darzustellen. Bereits seit einigen Jahren werden vermehrt Leichtbauplatten für die Möbelbranche entwickelt, hierzu zählen unter anderem die viel geschätzten und häufig eingesetzten Papierwabenplatten (POPPENSIEKER und THÖMEN, 2005) sowie leichte Spanplatten wie bspw. BalanceBoards (Pfleiderer,

2015). Bei den bisher verwendeten Leichtbauplatten handelt es sich i. d. R. um Sandwichplatten, die sich durch einen leichten Kern und zwei steife Deckschichten auszeichnen. Innerhalb dieser Forschungsarbeit soll untersucht werden, ob mittels einer Sandwichplatte der problematischen Rohstoffversorgung in der Holzwerkstoffbranche begegnet werden kann. Hierzu soll eine leichte Verbundplatte, die auf nachwachsenden, stärkehaltigen Einjahrespflanzen basiert, entwickelt und anschließend mit geeigneten Deckschichten beschichtet werden. Zur Ausformung der Verbundplatte soll Mais in Form von Popcorngranulat genutzt werden. Mit der Nutzung von Popcorngranulat können mehrere positive Aspekte gleichzeitig vereint werden, zum einen kann der Rohstoff Holz durch einen schnell nachwachsenden, lokal verfügbaren Agrarrohstoff substituiert werden und zum anderen ermöglicht das Granulat auf Grund des geringen Schüttgewichtes die Ausformung einer leichten Verbundplatte.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine popcornbasierte Sandwichplatte für den Möbelsektor zu entwickeln und die Eigenschaften dieser Platte umfassend zu untersuchen und zu bewerten. Hierzu sollen folgende Aspekte näher betrachtet werden:

- Untersuchung der chemisch-physikalischen sowie hygroskopischen Eigenschaften des Popcornmaterials und der Eignung des Popcorngranulats zur Ausformung einer leichten Popcornverbundplatte.
- Auswirkungen unterschiedlicher Rezepturen sowie Herstellungsbedingungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der entwickelten Verbundplatten. Hierbei finden die gesundheitsgefährdenden Formaldehydemissionen besondere Berücksichtigung.
- Entwicklung eines passenden Verfahrens zur Herstellung einer leichten Sandwichplatte innerhalb eines Rohdichtebereichs $< 500 \text{ kg/m}^3$.
- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Faktoren auf die Biegeeigenschaften der Sandwichplatten. Hierzu sollen Plattenstärke und Deckschichten in Dicke und Materialwahl variiert werden.
- Charakterisierung des Biegeverhaltens einer Sandwichplatte mittels 3-Punkt- sowie 4-Punkt-Biegeprüfung sowie die Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung der Biegeeigenschaften.
- Bewertung der Eigenschaften der entwickelten Sandwichplatte mit direktem Bezug zu bereits auf dem Möbelmarkt etablierten Leichtbauplatten.

2 Grundlagen

2.1 Situation der Holzwerkstoffindustrie

Deutschland ist ein waldreiches Land, das zu 30 % mit Wald bedeckt ist, was einer Fläche von 11,4 Mio. ha entspricht (BWI-3, 2014). Das Waldbild ist durch die Hauptbaumarten Gemeine Fichte (*Picea abies*), Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestica*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) sowie Stiel-Eiche (*Quercus robur*) geprägt. Diese stehen auf 73 % der zur Holzerzeugung dienenden Fläche, wobei die Fichte mit 25,4 % und die Kiefer mit 22,3 % die größten Anteile am Baumbestand ausmachen. Laubwälder bilden 43,4 % des Waldes und bestehen zu 15,4 % bzw. zu 10,4 % aus Buchen bzw. Eichen. Nadelwälder nehmen laut Bundeswaldinventur 2014 den größten Anteil (54,2 %) am Wald ein und bilden auch drei Viertel des Holzeinschlages. Andere Baumarten wie Lärche bzw. Douglasie sowie Lücken und Blößen nehmen 12,2 % der Fläche ein.

Die deutsche Forstwirtschaft sowie die be- und verarbeitende Holzindustrie sind auf den Einsatz von Nadelholz – insbesondere auf schwache und mittlere Dimensionen – spezialisiert. Im Jahr 2014 betrug nach Angaben des statistischen Bundesamtes der Holzeinschlag 54 Mio. m³ (ohne Rinde), wobei 74 % des Einschlages Nadelhölzer (Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Lärche) ausmachten (DSTATIS, 2015).

Die Holzbe- und verarbeitende Industrie hat in den letzten Jahren große Investitionen getätigt und kontinuierlich auf einen Kapazitätenausbau gesetzt. Diese hochtechnisierten Anlagen haben einen enormen Holzbedarf und bedingt durch den globalen Wettbewerb dürfen in den Produktionsketten der Hersteller keine Engpässe hinsichtlich der Rohstoffversorgung auftreten. So wird eine permanente Zufuhr an Rohstoffen wie Holz, Bindemittel und Energie benötigt. Jedoch sind innerhalb der vergangenen Jahre die Preise für Energieträger kontinuierlich angestiegen und trotz einer kurzfristigen Entspannung der Rohölpreise – angesichts der gegenwärtigen Konjunktorentwicklung, neuer Technologien in der Tiefseebohrung, Schiefergasförderung usw. – ist abzusehen, dass die Preisspirale in naher Zukunft wieder aufwärts gehen wird (FAZ, 2015). Die Entwicklung des Energiemarktes hat in den letzten Jahren ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Holzmarkt und dessen anschließende Industrie ausgeübt. Es hat sich gezeigt, dass Energiepolitik (Erneuerbare Energien Gesetz) und Energiepreise zunehmend den Holzmarkt und die Holznachfrage beeinflusst haben (MANTAU, 2012). Angeregt durch politische Fördermaßnahmen hat die Verwendung von Holz und anderer Biomasse zur Gewinnung von Strom bzw. Wärme deutlich zugenommen und ein wachsender Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen konnte verzeichnet werden (SAUERWEIN, 2013). Neben der Holzbe- und verarbeitenden Industrie führt die stärker werdende Nachfrage nach Holz für eine

energetische Nutzung zu einer Verteuerung dieses Rohstoffes und womöglich zu einer Verknappung bestimmter Rohholzsortimente. In den letzten 10 Jahren ist die Verwendung von Holz als Energieträger um fast das Doppelte von ca. 5,9 Mio. m³ auf 11,1 Mio. m³ gestiegen (DSTATIS, 2015).

Wie bereits erwähnt, hat der Energiesektor einen erheblichen Einfluss auf die Holznachfrage, wobei die konjunkturelle Abhängigkeit nicht vernachlässigt werden darf. So konnte 2005 ein Holzverbrauch von ca. 115 Mio. m³ registriert werden, dieser stieg bis 2010 auf 135 Mio. m³ an. Der Anstieg von 20 Mio. m³ ist allein auf eine erhöhte Nachfrage für energetische Zwecke zurückzuführen, wobei etwa 6 Mio. m³ hiervon auf den privaten Hausbrand entfallen. Im Jahr 2005 wurden noch mit 61,0 % mehr Holz für stoffliche Zwecke eingesetzt als für eine energetische Nutzung (38,9 %). Doch bereits im Jahr 2010 lag die energetische Nutzung bei 50,5 %, folglich wurde mehr Holz energetisch als stofflich genutzt (MANTAU, 2012b). Zurzeit liegt die Verwendung von Holz für stoffliche Zwecke bei ca. 70 Mio. m³ und unterliegt den konjunkturellen Einflüssen stärker als die energetische Verwendung, die derzeit einen Holzanteil von ca. 80 Mio. m³ aufzeigt (MANTAU, 2012b).

2.2 Getreide

In der Ernährung des Menschen nimmt Getreide auf Grund seiner zahlreichen positiven Eigenschaften einen hohen Stellenwert ein. Hierzu zählen unter anderem eine hohe Nährstoffkonzentration, gute Lager- und Transportfähigkeit sowie vielfältige Verwendungsmöglichkeiten in Lebensmitteln sowie im industriellen Sektor (BOUTARD, 2012).

Die unterschiedlichen Getreidesorten weisen im Wesentlichen eine gleiche chemische Zusammensetzung auf, jedoch können spezifische Unterschiede auftreten. Diese Variationen sind häufig arten- und sortenspezifisch, wetterabhängig und können stark von den Standortbedingungen beeinflusst sein. Grundbaustein jedes Getreides und somit mengenmäßig am bedeutendsten ist Stärke, sie befindet sich in Form von wasserunlöslichen Stärkekörnchen im Endosperm des Getreidekorns. Neben Stärke weist Getreide höhere Bestandteile an Lipiden und Proteinen im Keimling sowie Cellulosen, Hemicellulosen und Mineralien in den Schalenschichten auf (KLINGLER, 1995). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Inhaltsstoffe der bedeutendsten Getreidesorten.

Getreide ist ein wichtiger Kohlenhydrat- und Eiweißlieferant und daher in vielen Bereichen der Welt für die Ernährung essentiell. Heute werden 2 Mrd. t Getreide auf 65 % der weltweit verfügbaren Ackerflächen produziert. Zu den wichtigsten Getreidepflanzen zählen Weizen (723 Mio. t), Mais (988 Mio. t) und Reis (475 Mio. t) und mit Abstand Gerste (135 Mio. t) (DMK,

2015). Die ernährungsrelevante Bedeutung von Getreide ist nicht in allen Ländern gleich und hängt zum großen Teil vom jeweiligen Entwicklungsgrad des Landes ab. Je höher der Lebensstandard der Bevölkerung und die Technisierung eines Landes sind, desto geringer ist der Anteil an Getreideprodukten an der täglichen Ernährung und umso höher fällt der Anteil an Fleisch, Zucker und Fett aus (KLINGLER, 1995).

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der häufigsten Getreidesorten (KLINGLER, 1995)

Getreideart	Stärke in %	Eiweiß in %	Lipide in %	Mineralien in %
Weizen	79,5	13,5	2,2	1,9
Roggen	78,0	12,5	1,9	2,2
Gerste	77,0	11,5	2,9	2,9
Mais	68,5	9,6	5,3	1,8
Reis	87,5	6,5	1,2	1,2

Der größte Anteil der jährlichen Getreideernte wird für die Ernährung von Menschen und Tieren verwendet. In den hoch technisierten Industrienationen liegt der Anteil des verfütterten Getreides zwischen 60,0 % und 70,0 %, dagegen werden in den weniger technisierten Ländern lediglich 5,0 % bis 7,0 % für die Erzeugung von tierischen Produkten eingesetzt (DMK, 2015). Im Vergleich zur Nahrungsproduktion ist der Einsatz von Getreide für industrielle Zwecke gering. Diese stellt einen wichtigen Roh- bzw. Hilfsstoff für die chemisch-technische und pharmazeutische Industrie dar (HALLEY et al., 2014).

2.2.1 Die Maispflanze (*Zea mays ssp. mays*)

Die ältesten Funde einer Maispflanze, bei denen es sich bereits um kultivierte Maispflanzen handelte, wurden in einer Höhle in Südmexiko gemacht. Schätzungen zufolge lassen sich die Funde auf 5200 Jahre bis 3400 Jahre v. Chr. datieren (RÖSER, o. J.). Heute ist die Maispflanze weltweit verbreitet und stellt in vielen Ländern ein Grundnahrungsmittel dar (KLINGLER, 1995). Zu den wichtigsten Produzenten und Exporteuren gehören Nordamerika, Argentinien, Frankreich sowie Südafrika (DMK, 2015). In der Verwendung von Mais gibt es zwischen den Ländern sehr große Unterschiede, Mais gilt in vielen Ländern Osteuropas aber auch in Mexico und in Südamerika als bedeutendes Grundnahrungsmittel und dient der täglichen Ernährung. Dagegen wird die Maispflanze in den Industrieländern hauptsächlich zur Veredelung, also der Umwandlung von pflanzlichen Produkten in höherwertige Tierprodukte, verwendet. Hierbei wird sie in Form von Maissilage als Tierfutter verwendet (KLINGLER, 1995). Sie zählt mit zu den wichtigsten Getreidepflanzen und hat mit ca. 988 Mio. t auf etwa 178 Mio. ha den höchsten

Ernteertrag (DMK, 2015). Ferner nimmt sie diese bedeutende Stellung auf Grund des hohen Energiegehaltes und der guten Verarbeitungsmöglichkeiten ein.

Mais gehört zur Gruppe der einjährigen Gräser (*Poaceae*) und ist aus einem markgefüllten Halm, der eine Höhe von 1,5 m bis 3,0 m erreichen kann, und zahlreichen Blättern aufgebaut. Die Blätter sind dunkelgrün und in zwei Zeilen am Halm angeordnet und erreichen durchschnittlich eine Länge von 1 m und eine Breite von 10 cm. Mais besitzt ein bis drei Spindeln, den so genannten Maiskolben, auf denen in 10 bis 15 Reihen 15 bis 50 Maiskörner sitzen. Jedes Maiskorn besitzt im Inneren einen Samen, der sich aus dem Embryo und dem Nährgewebe zusammensetzt. Der Maisembryo besteht aus einem Keimblatt (Scutellum) mit einer engen Bindung zum Endosperm, sodass der Embryo die Nährstoffe aus dem Endosperm während der Keimung aufnehmen und so eine neue Maispflanze entstehen kann (BRÜCHER, 1982; JOHNSON, 2000). Bei der Maispflanze handelt es sich um eine C4-Pflanze, das heißt die Pflanze ist in der Lage Sonnenenergie effektiver zu nutzen und zudem deutlich mehr CO₂ aufzunehmen als bspw. C3-Getreidearten (z. B. Hafer, Reis, Roggen oder Weizen). Die stärkere Anziehung des CO₂ wird durch ein Enzymsystem, das sich von den C3-Pflanzen unterscheidet, herbeigeführt. Hierdurch ist die Pflanze fähig mehr Trockenmasse aufzubauen, andere Getreidearten benötigen für die gleiche Leistung eine längere Vegetationszeit. Neben den genannten Eigenschaften besitzt die Maispflanze auch einen geringen Transpirationswasserverbrauch, das heißt sie zeichnet sich durch eine positive Wasserverwertung im Vergleich zur C3-Pflanze Weizen aus (RICHTER, 1997; HIBBERD et al., 2008; DMK, 2015).

Laut dem deutschen Maiskomitee e. V. (2014) nimmt in der EU die Anbaufläche für die Produktion von Silagemais rund 6,05 Mio. ha und für Körnermais 9,58 Mio. ha ein. Wobei die Anbauflächen in den letzten 10 Jahren sowohl für die Körner- als auch für die Silageproduktion kontinuierlich gestiegen sind. In Deutschland wurde für die Silage- bzw. Körnermaisproduktion eine Fläche von etwa 2,09 Mio. ha bzw. 481.000 ha in Anspruch genommen und erlangte im Jahr 2014 einen Ernteertrag von 99,2 Mio. t bzw. 5,1 Mio. t.

2.2.2 Verwendung von Mais

Die Maispflanze stellt einen wichtigen Beitrag für die Erzeugung von Tierfuttermitteln dar. Die Erntemenge von einem Hektar Körnermais kann ca. 30 Mastschweine ernähren und die Erntemenge von einem Hektar Silomeis stellt den Jahresgrundfutterbedarf von 3 bis 4 Kühen dar (DMK, 2015). Neben der Tierfuttermittelproduktion nimmt die Maispflanze in der Ernährung der Menschen eine bedeutende Stellung ein. In der Lebensmittelindustrie finden native und modifizierte Stärken in fast allen Bereichen Verwendung, ferner gibt es ein breites

Anwendungsfeld von Stärken in der chemisch-technischen sowie in der pharmazeutischen Industrie. Neben der Maispflanze dienen auch Weizen und Kartoffeln als wichtige Stärkelieferanten (JOBLING, 2003,). Jedes Jahr werden ca. 22 Mio. t landwirtschaftliche Erzeugnisse zur Stärkeproduktion verwendet (vgl. Tab. 2). In Deutschland wurden im Jahr 2013 etwa 3,70 Mio. t Rohstoffe zu 1,58 Mio. t Stärke verarbeitet, hierbei wurden 42 % aus Kartoffeln, 34 % aus Weizen sowie 24 % aus Mais gewonnen. Im Bereich des Food-Sektors werden 59 % der produzierten Stärke weiter verarbeitet, hierbei ist der Süßwarenssektor mit 19 % ein wichtiger Abnehmer. Des Weiteren wird Stärke zu 41 % im Non-Food-Bereich bspw. im Papier- und Wellpappensektor (34 %) oder in der chemischen Fermentationsindustrie (7 %) eingesetzt (VDGS, 2015.).

Tabelle 2: Verwendung von Agrarpflanzen zur Stärkeproduktion im Jahr 2010 (VDGS, 2015)

Agrarprodukt	Europa in Mio. t	Deutschland in Mio. t
Kartoffeln	7,04	2,20
Mais	7,48	0,68
Weizen	7,48	1,12

2.2.3 Aufbau und Struktur des Polysaccharides Stärke

Stärke wird den Kohlenhydraten zugeordnet und ist neben Cellulose mengenmäßig am bedeutendsten und auch in vielen technischen Prozessen von enormer Wichtigkeit. Da immer häufiger fossile Rohstoffe durch Stärke substituiert werden, ist abzusehen, dass Stärke und Stärkederivate auch zukünftig eine wichtige Position in der Prozesstechnik einnehmen werden (TEGGE, 2004).

Stärke ist ein aus Glucose-Monomeren zusammengesetztes Makromolekül, das in Form von Stärkekörnern in den Speicherorganen (Samenkörner, Wurzeln und Knollen) der Pflanzen zusammengefasst wird. Die Stärkekörner können in Form und Größe stark variieren und zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Stärkeart. Der Durchmesser der Stärkekörner kann eine Größe von 0,1 µm bis 200,0 µm erreichen (PEREZ und BERTOFT, 2010). Innerhalb dieser gibt es kristalline und amorphe Bereiche (ZOBEL, 1988). Durch Verkleisterung oder Abbau verliert die Stärke seine kristallinen Eigenschaften (RATNAYAKE und JACKSON, 2006). Die Stärkesynthese erfolgt in den Amyloplasten und wird über viele einzelne Reaktionen mit Hilfe verschiedener Enzymsysteme sichergestellt. Die einzelnen Stärkemoleküle sind über glykosidische Bindungen miteinander verbunden, hierbei wird zwischen den unverzweigten α -1,4-Bindungen der Amylose mit einem Polymerisationsgrad von 1.000 bis 5.000 und der verzweigten α -1,6-Bindung des

Amylopektins (Polymerisationsgrad 6000 bis ca. 10^6) unterschieden (HALLEY und AVEROUS, 2014). Die unverzweigt geformten Amylosen bilden 20 % bis 30 % des Polysaccharides, 70 % bis 80 % des Saccharides bestehen aus verzweigten Amylopektinen. Hierbei muss beachtet werden, dass es auch Stärkearten mit einer anderen Verteilung gibt, das Verhältnis hängt dabei stark von der pflanzlichen Herkunft ab. Die Verkettung der Moleküle geschieht durch Verknüpfung der glycosidischen Hydroxylgruppen vom C-Atom 1 mit der alkoholischen Hydroxylgruppe am C-Atom 4 eines benachbarten Glucosemoleküls. Bei der Bindung von zwei Glucosemolekülen wird ein Molekül Wasser abgespalten, so dass die folgende Reaktionsgleichung (1) gilt:



Neben den Kohlenhydraten befinden sich in den Stärkekörnern auch andere Substanzen, die teilweise in fester oder ohne chemische Bindung vorliegen. Diese haben starken Einfluss auf die Stärke und deren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Bei diesen Substanzen handelt es sich unter anderem um lipoidartige Substanzen, Fette sowie Fettsäuren. Ferner findet sich in Stärke ein geringer Anteil an Stickstoff, der in proteinhaltiger Form gebunden vorliegt. Neben diesen Bestandteilen nimmt Wasser einen Anteil von 12 % bis 21 % ein, wobei Getreidestärke maximal einen Anteil von 14 % aufweist. Unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten während der Lagerung können den Wassergehalt der Stärke jedoch sehr stark variieren (TEGGE, 2004).

2.2.3.1 Expansion von Stärke zu Stärkegranulat

In der Lebensmittelindustrie werden verschiedene Verfahren verwendet, um Stärke umzuformen und weiteren Anwendungen zuzuführen. Hydrothermische Prozessverfahren ermöglichen über verschiedene Prozessschritte die Umformung von Stärke in bspw. Stärkegranulat, die anschließend in der Lebensmittelindustrie z. B. zu Frühstückscerealien weiterverarbeitet werden können. Durch Einwirkung von Temperatur verkleistert die Stärke und durch eine spezielle Prozessführung ist die Expansion zu Granulat möglich (DE PINHO FERREIRA GUINE und DOS REIS CORREIA, 2014).

Eine Verkleisterung ist für viele Prozesse in der Lebensmittelindustrie wie bspw. für die Herstellung von Frühstückscerealien oder für das Backen von Brot und Kuchen von enormer Wichtigkeit. Durch die Einwirkung von Temperatur und Wasser beginnen die Stärkekörner unumkehrbar zu quellen. Hierbei handelt es sich um den Prozess der Verkleisterung, dieser bewirkt die Auflösung der molekular geordneten Verbindungen und führt zur Degeneration der Stärkestruktur (BILIADERIS et al., 1980). Bisher ist der genaue Prozess der wärmeinduzierten Degeneration der Stärke nicht genau bekannt und verstanden (RATNAYAKE und JACKSON, 2009). Im

Folgenden soll der bisherige Stand des Wissens genauer beschrieben werden. Zu Beginn des Verkleisterungsprozesses diffundiert Wasser in das Stärkekorn, hierdurch wird eine erhöhte Mobilisierung der Stärkepolymere in den amorphen Bereichen bewirkt. Innerhalb der amorphen Bereiche ordnen sich die Stärkefragmente unter Ausbildung neuer Bindungen neu an. Bei einer weiteren Hitzezufuhr werden die Stärkepolymere beweglicher und verlieren ihre intermolekularen Wechselwirkungen. Die Stärkestruktur löst sich auf, d. h. die Helix wird aufgelöst und es entsteht ein Konglomerat aus zufällig angeordneten Molekülen. Eine weitere Erhitzung der Stärkemasse bewirkt eine starke Quellung, die schließlich zum Platzen der Stärkekörner führt (RATNAYAKE und JACKSON, 2006). Die Verkleisterung ist abhängig von der Temperatur und der Stärke des Getreides, wie die folgende Abbildung 1 zeigt.

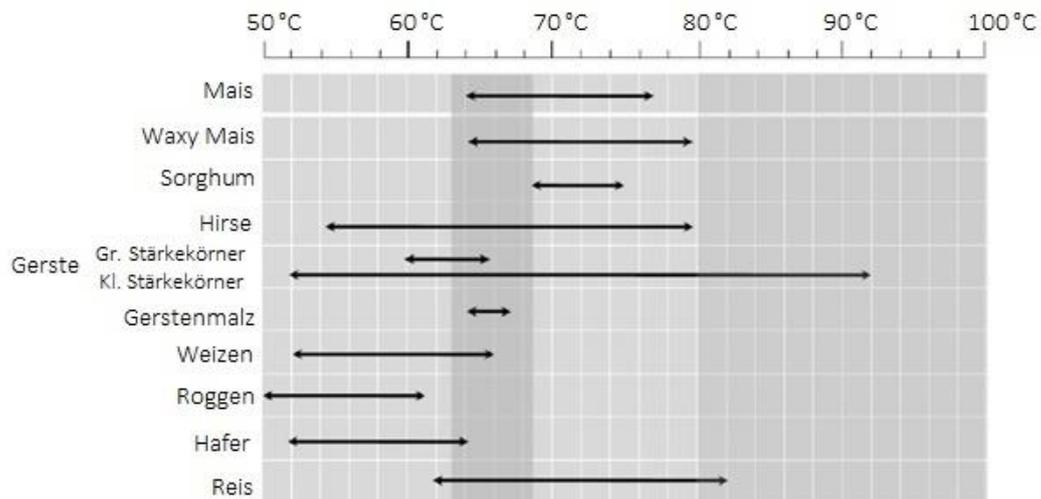


Abbildung 1: Verkleisterungstemperatur für unterschiedliche Getreidesorten (nach BRIGGS, 1998).

2.2.3.2 Aufpuffen von Stärke

Das Puffen von Getreide, also das Aufschließen des Inhaltsstoffes Stärke, bezeichnet ein Verfahren zur Umwandlung von Stärke in ein vielseitig verwendbares Produkt wie bspw. Frühstückscerealien. Das Prinzip des Aufpuffens von Getreidekörnern basiert auf einem geschlossenen System, in dem die Körner erhitzt und expandiert werden. Getreidekörner mit einem Wassergehalt von 12 % bis ca. 14 % werden in einen geschlossenen Reaktor gegeben und mit Hilfe einer Wärmequelle von außen erhitzt, hierdurch steigt der Druck im Behälter kontinuierlich an. Nach einer kurzen Zeitspanne wird der Druck aus dem System entlassen und die erhitzten, unter Druck stehenden Getreidekörner erhalten schlagartig Raum zum Expandieren. Mit einem lauten Knall puffen die Getreidekörner auf und entwickeln sich zu einer schaumartigen Masse. Durch die Erwärmung der Getreidekörner wird die Verkleisterung der Stärke initiiert und zusätzlich durch die Verringerung des äußeren Drucks reißt die selbst unter

Druck stehende Getreidehülle auf und entlässt die verkleisterte Masse aus dem Inneren des Korns (MATZ, 1991; KENT und EVERS, 1994). Die treibende Kraft bei diesem Verfahren ist die Verdampfung des Wassers im Inneren der Getreidekörner und zusätzlich der schnelle Wechsel von Temperatur und Druck. Durch das Aufpuffen expandiert das Getreidekorn und erreicht eine Volumenausdehnung um das 12-fache, hierdurch wird die Schüttdichte der Körner/ des Granulates deutlich reduziert (DELCOUR und HOSENEY, 2010).

Das in der Vergangenheit oft verwendete Verfahren war neben der enormen Lärmbelastung auch durch eine lange Prozessdauer nicht sehr effizient. Erst in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts konnte durch das Zuführen von gesättigtem Dampf direkt in den Reaktor und in den 70er Jahren durch zusätzliches Vorwärmen der Getreidekörner das Verfahren deutlich beschleunigt werden. Durch diese zusätzlichen Verfahrensschritte konnte der Prozess zeitlich effizienter gestaltet werden, jedoch wurde die Vorwärmung des Getreides in einer rotierenden Röhre durchgeführt, wodurch eine gleichmäßige Wärmeübertragung nicht gewährleistet werden konnte. Eine ungleichmäßige Erwärmung der Getreidekörner führte beim plötzlichen Druckabfall zu einer ungleichmäßigen Ausformung der gepufften Cerealien (BICHSEL, o. J.).

Das zum Großteil in dieser Arbeit verwendete Popcornmaterial wird nach dem neuen „Cerex-Verfahren“ der Cerex AG, CH-3368 Bleienbach aufgeschlossen. Bei diesem Puffing-System gibt es einige Modifikationen zum oben beschriebenen Verfahren zu beachten. Dieses System kann in die drei Hauptkomponenten Vorheizelement, Reaktor und Expansionselement gegliedert werden.

Ziel des Prozessschrittes des Vorheizens ist eine gleichmäßige und schonende Erwärmung der gesamten Cerealien auf ca. 100 °C, ohne jedoch den Wassergehalt der Getreidekörner zu reduzieren. Das entwickelte Heizelement umfasst einen starken, frei fließenden Luftstrahl, dieser bewirkt einen Luftwirbel im Inneren des Vorheizelements. Durch die verursachte Zirkulation werden alle Cerealien gleichmäßig mit warmer Luft umströmt und somit erwärmt. Nach der Wärmeübertragung gelangen die Getreidekörner in den Reaktor. Zur Expansion der Getreidekörner ist ein Energieeintrag von 250 kJ bis 300 kJ pro aufzupuffendes Getreidekilo notwendig. Diese Energiemenge wird mit Hilfe von überhitztem Dampf über zahlreiche Inlets in den Reaktorwänden in das System eingebracht. Mit Hilfe des Dampfes ist es möglich die Prozesszeit zu verkürzen ohne damit die Qualität der Cerealien herabzusetzen. Wichtig ist jedoch das Vermeiden einer Kondensationsbildung, da ansonsten der Energieeinsatz zur Fortführung des Prozesses deutlich erhöht wird. Am Ende des Prozesses wird der Reaktor über ein Ventil geöffnet und das Produkt kontrolliert in das Expansionselement weitergeleitet. In diesem Teil des

Prozesses durchlaufen die Cerealien einen Raum, der ihnen innerhalb einer limitierten Zeitspanne die Möglichkeit zum Expandieren gibt. Anschließend werden die gepufften Cerealien gesammelt und von den nicht aufgepufften Materialien und Stäuben getrennt (BICHSEL, O. J.).

Das Aufpuffen bewirkt nicht nur eine Transformation des Getreidekorns, zusätzlich werden auch die strukturellen und physikalischen Eigenschaften der Stärke stark verändert. So sind die aufgepufften Cerealien in der Lage schnell Feuchtigkeit aufzunehmen und das Produkt besitzt zudem ein höheres Wasserrückhaltevermögen als die Getreidekörner oder auch als Mehl (DE PINHO FERREIRA GUINE und DOS REIS CORREIRA, 2014).

2.3 Leichtbau – Motive

Eine angestrebte Anwendung von Leichtbau kann unterschiedliche Gründe haben und ist nach WIEDEMANN (2006) als Absichtserklärung zu verstehen. So sind die Gründe Leichtbaustrategien einzusetzen sehr vielfältig und können unter anderem ökologischer, ökonomischer oder systemfunktionaler Natur sein. Leichtbau verspricht in vielen Bereichen erhebliche wirtschaftliche Vorteile für die Zukunft, so können durch Einsparungen von Gewicht Material- und Transportkosten gesenkt oder Konstruktionen so überhaupt erst realisiert werden. Gründe für eine Gewichtsreduzierung werden in die drei Kategorien „Öko-Leichtbau“, „Spar-Leichtbau“ sowie „Zweck-Leichtbau“ unterteilt.

„Öko-Leichtbau“ verhilft die Kosten im Energiebereich bspw. für den Transport von Produkten zu reduzieren, ist aber oft – auf Grund teurer und hochwertiger Materialien – mit deutlich höheren Herstellungskosten verbunden. Die höheren Produktionskosten werden jedoch mit den abzusehenden Preissteigerungen für nichterneuerbare Energieträger gerechtfertigt. Dagegen ist das primäre Ziel des „Spar-Leichtbaus“ eine Kostenreduzierung durch Materialeinsparungen bzw. die Verwendung von alternativen und gleichzeitig günstigeren Rohstoffen in der Produktion. Wenn Leichtbau aus statischen Gründen angewendet wird, um so eine Konstruktion zu realisieren, dann wird von „Zweck-Leichtbau“ gesprochen (Wiedemann, 2006).

2.3.1 Leichtbau in der Holzwerkstoffindustrie bzw. in der Möbelbranche

Die Gründe für die Anwendung von Leichtbaustrategien können wie bereits erwähnt (vgl. Kap. 2.3) sehr vielfältig sein und sind für die Holzwerkstoffindustrie nicht gänzlich unbekannt. In den 50er Jahren stößt der akute Rundholzmangel der Nachkriegszeit die Entwicklung der Spanplatte aus Holzreststoffen an (MARUTZKY, 1997). Die Spanplatte bot eine Möglichkeit dem Rohstoffmangel zu begegnen und gleichzeitig die Holzreststoffe nicht nur energetisch zu nutzen, sondern – durch die Entwicklung einer Holzwerkstoffplatte mit guten mechanisch-

technologischen Eigenschaften – einer weiteren effizienten Nutzung zuzuführen. Mit Hilfe der etablierten Holzwerkstoffe Spanplatte und mitteldichte Faserplatte (MDF) konnte der Rohstoff Holz effizient verwendet werden, doch kann bei diesen Produkten nicht von Leichtbauplatten gesprochen werden. Nach CLAD (1982) wurden die klassischen Holzwerkstoffe in den Jahren von 1955 bis 1972 erst einmal kontinuierlich schwerer und erreichten eine Plattenrohddichte von 720 kg/m^3 . In den darauffolgenden Jahren wurden große Anstrengungen von Seiten der Holzwerkstoffindustrie unternommen, um die Plattenrohddichte zu senken ohne dabei die Eigenschaften des Werkstoffes zu komprimieren. Zur Reduzierung der Rohddichte wurden verschiedene Lösungsansätze in Betracht gezogen, so kamen unter anderem Biomasse und Stroh (als Füllmaterial für Türen) zur Herstellung einer leichten Platte zum Einsatz (NIEMZ und WAGENFÜHR, 2008). Ein weiterer Ansatzpunkt stellte die Verwendung von Schaumstoffsystemen dar, mit Hilfe gasbildender Schäumungsmittel versuchten HIMMELHEBER et al. (1956; 1958) und später DEPPE (1968) eine Holzspan-Schaumstoffverbundplatte in einem Rohddichtebereich unterhalb 500 kg/m^3 zu entwickeln.

Neben der Entwicklung der Spanplatte wurde dem Ressourcenmangel ebenfalls mit Leichtbauanwendungen in Form von Sandwichplatten mit Wabenkernfüllung bzw. mit hohlem Kern, der mit Massivholzleisten gestützt wurde, begegnet. Ein weiteres und bereits auf dem Markt etabliertes Leichtbauprodukt stellt die Röhrenspanplatte dar.

Für Leichtbauplatten in der Holzwerkstoffindustrie ist bisher noch keine feste Grenze definiert, doch wird im Allgemeinen der Rohddichtebereich unterhalb 500 kg/m^3 für Plattenwerkstoffe als Leichtbau angesehen (STOSCH, 2004). Die folgende Abbildung 2 macht deutlich, dass somit auch herkömmliche und klassische Werkstoffe wie z. B. die Tischlerplatte, aber auch die Röhrenspanplatte und bestimmte Sperrhölzer in diese Kategorie fallen.

In den letzten 15 Jahren sind viele neue und innovative, leichte Produkte auf den Markt gekommen, bei denen es sich um eine Kombination verschiedener Materialien unter Verwendung von Klebstoffen handelt. Diese Produkte haben bisher oft eine Randposition inne, da die neuartigen Werkstoffe teurer und in der Produktion aufwendiger sind als die klassischen Holzwerkstoffe wie Spanplatten oder MDF (POPPENSIEKER und THÖMEN, 2005). Ein weiterer Grund für die Sonderstellung der Leichtbauplatten ist, dass diese Produkte nicht so vielfältig einsetzbar sind, es handelt sich hierbei eher um Spezialplatten mit spezifischen Eigenschaften sowie mit nur gering variablen Plattendicken. Bisher sind Platten, die deutlich unterhalb des Gewichts einer Spanplatte liegen nur in Dicken zwischen 30 mm und 40 mm mit konkurrenzfähigen Festigkeiten erhältlich.

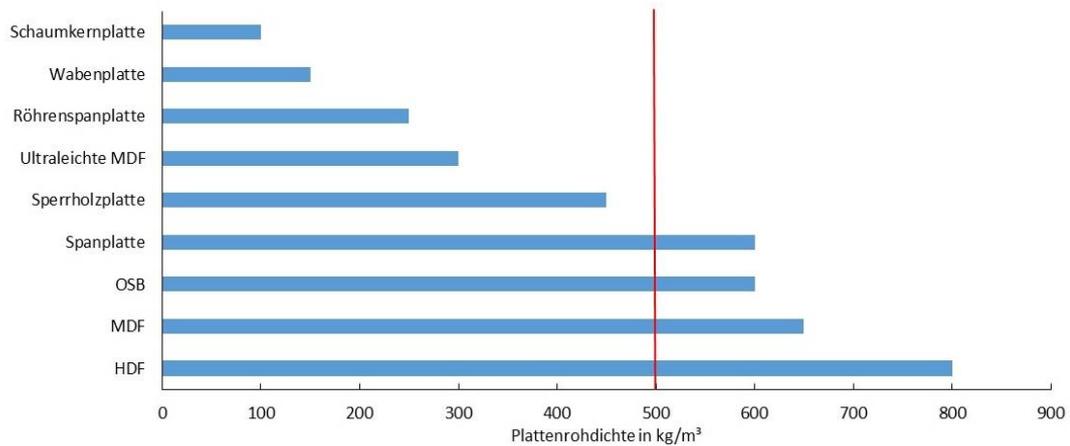


Abbildung 2: Übersicht von Plattenwerkstoffen und ihren Rohdichten (nach BECKER et al., 2004).

Auf Grund der fortlaufenden Verknappung der Ressource Holz ist es absehbar, dass sich in Zukunft die Bereitstellung von Holz, insbesondere von Nadelholz für die Auslastung der Span- und MDF-Plattenwerke nur mühsam bewerkstelligen lässt. Daher ist es für die Holzwerkstoffindustrie von enormer Bedeutung Alternativen zum Rohstoff Holz und zum klassischen Holzwerkstoff zu finden. Somit ist es bei gegebener Bereitschaft der Holzwerkstoffindustrie zur Entwicklung neuer Plattentypen sehr wahrscheinlich, dass sich leichte Werkstoffe immer weiter auf dem Markt etablieren werden.

Bereits seit 2010 wird am Büsgen-Institut der Universität Göttingen intensiv an der Problematik der Rohstoffverknappung in der Holzwerkstoffindustrie sowie nach Alternativen zu den herkömmlich verwendeten Rohstoffen geforscht. Untersuchungen zeigen, dass die Herstellung von Spanplatten mit geringen Rohdichten ($< 500 \text{ kg/m}^3$) möglich ist. Mit der Verwendung der Küstentanne (*Abies grandis*) kann ein alternativer Rohstoff zu den Industrieholz- bzw. Fichtenholzspänen zum Einsatz kommen, jedoch handelt es sich bei der Küstentanne um einen Rohstoff der für eine umfangreiche Spanplattenproduktion in Deutschland nicht in ausreichenden Vorräten zur Verfügung steht (VOS, 2010; VOS und KHARAZIPOUR, 2010). Ein weiterer im Büsgen-Institut erforschter Lösungsansatz sind rohdichtereduzierte Span- bzw. Faserplatten auf Basis von Einjahrespflanzen, hierzu zählt auch das im Institut entwickelte und von der Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH & Co produzierte BalanceBoard. Bei diesem Plattenwerkstoff handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, der aus Holzspänen und expandierten, stärkehaltigen Granulatpartikeln besteht. Durch die Substituierung von Holz durch das Einbringen von Stärkegranulat ist eine Absenkung der Plattenrohddichte möglich, ohne hierbei eine Reduzierung der mechanisch-technologischen Eigenschaften hervorzurufen (KHARAZIPOUR und BOHN, 2006; PFLEIDERER, 2015). Trotz der Rohdichtereduzierung und damit einhergehenden

Gewichtsreduktion um ca. 30 % erreichen die Verbundwerkstoffe mit Granulatbeimischung in der Mittelschicht vergleichbare Festigkeitseigenschaften wie herkömmliche Spanplatten des Plattentyps P2 für die Innenanwendung im Möbelbau (KHARAZIPOUR et al., 2011; RITTER, 2012). Ein weiterer Vorteil, der sich aus der Nutzung von Agrarrohstoffen ergibt, ist eine größere Unabhängigkeit vom Holzmarkt, da so auf alternative Ressourcen, die innerhalb eines Jahres nachwachsen, zurückgegriffen werden kann (KHARAZIPOUR und BOHN, 2010).

Neben Spanplatten, die zum Teil aus schnell wachsenden Agrarrohstoffen bestehen, gibt es bereits seit vielen Jahren die Röhrenspanplatte, die häufig für die Türenherstellung verwendet wird. Bei diesem Plattentyp handelt es sich um eine Röhrenplatte, die nach dem Strangpressverfahren hergestellt wird. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Späne senkrecht zur Plattenebene angeordnet sind und dementsprechend als charakteristische Eigenschaft dieser Platte eine hohe Druckfestigkeit sowie eine geringe Dickenquellung bei gleichzeitig niedrigem Gewicht mit sich bringen (DEPPE und ERNST, 2000).

Neben leichten Spanplatten finden Sandwichplatten mit homogenen Schaumkernen oder strukturierten Wabenkernen häufig Anwendung. Bei diesen Platten handelt es sich um einen i. d. R. dreischichtigen Verbundwerkstoff, der aus zwei Deckschichten und einer Kernlage besteht (ZENKERT, 1997). Diese Sandwichplatten weisen eine Rohdichte zwischen 100 kg/m^3 und 350 kg/m^3 auf und besitzen ein positives Verhältnis von Gewicht und Festigkeit, ferner zeigt dieser Werkstoff, abhängig von der Materialwahl weitere positive Eigenschaften wie Temperaturstabilität und Feuerresistenz (AICHER, 1984). Sandwichwabenplatten finden in der Möbelindustrie am häufigsten Anwendung (POPPENSIEKER und THÖMEN, 2005).

2.3.2 Sandwichverbundplatten und ihr Tragverhalten

Ein Sandwichelement ist ein Verbundwerkstoff, der grundsätzlich immer nach demselben Modell aufgebaut ist. Es handelt sich i. d. R. um einen Werkstoff aus mehreren starren, miteinander schubfest verbundenen Schichten verschiedener Materialien mit unterschiedlichen physikalischen-technologischen Eigenschaften. Ein Sandwichelement besteht häufig aus drei Schichten: zwei steifen und dünnen Deckschichten und einer dicken, leichteren und schubweichen Mittelschicht bzw. Kernlage (ALLEN, 1969; ZENKERT, 1997; DAVIES, 2001). Allgemein lassen sich Sandwichelemente wie folgt unterscheiden: Sandwichplatten weisen einen symmetrischen bzw. unsymmetrischen Aufbau auf, besitzen dicke bzw. dünne Deckschichten und sind ausgestattet mit leichten oder steifen Kernlagen. Des Weiteren können die Deckschichten und auch die Kernmaterialien isotrop oder anisotrop charakterisiert sein. Für die Materialwahl

sollten nach Möglichkeiten steife Deckschichten mit hohen Elastizitätsmodulen und schubfeste Kernmaterialien ausgewählt werden (WIEDEMANN, 2006).

Bei einer Biegung kann der Werkstoff mit einem Balkenprofil verglichen werden, wobei die Deckschichten den Gurten und der Kern dem Steg eines I-Trägers entsprechen (ZENKERT, 1997). Dem Kernmaterial kommt die Aufgabe zu die dünnen Deckschichten zu stützen und einen möglichst großen Abstand zwischen diesen zu realisieren. Je größer der Abstand zwischen den Deckschichten ist, desto größer ist das Flächenträgheitsmoment und somit auch die Steifigkeit der Platte (KLEIN, 2011). Neben der Stabilisierung des Sandwichelements übernimmt die Kernlage auch die Aufnahme der Querkräfte, die während einer Biegebelastung auf Grund von Zug- und Druckspannungen im Element entstehen. Auf Grund der Querkräfte ist es notwendig, dass der Kern selbst auch eine gewisse Steifigkeit besitzt, um bei einer Biegung eine Verformung durch Schubspannungen möglichst abzuwenden. Wenn die verwendeten Deckschichten keine Eigenbiegesteifigkeit besitzen, nimmt der Kern der Platte die gesamte Querkraft auf. Dagegen nehmen die Deckschichten die aus der Biegung resultierenden Spannungen, die direkt auf die Deckschichten wirken, auf. Auch die Kernlage nimmt einen Teil der Biegespannungen auf, dieser Anteil gilt jedoch in der Sandwichtheorie als vernachlässigbar (ALLEN, 1969; WIEDEMANN, 2006;). Für ein Sandwichelement ist es von Bedeutung, dass die Verbindung zwischen Kern- und Deckschicht möglichst zug- und gleichzeitig schubfest ist (KLEIN, 2011). Bei Sandwichelementen, deren Kernstrukturen die Deckschichten nur punktuell stützen – wie bspw. Honigwaben – ist eine sichere Verbindungstechnik essentiell für das Tragverhalten. Neben den gängigen Verbindungen durch Verklebungen oder Formschäumen können auch Verfahren wie Löten, Schweißen oder Verschrauben eingesetzt werden. Diese Verfahren spielen jedoch eher eine untergeordnete Rolle (AICHER, 1984).

Als Folge der Konstruktion und der Kombination verschiedener Materialien weist ein Sandwichelement zwei wesentliche Vorteile gegenüber einer herkömmlichen Spanplatte auf, zum einen besteht der Werkstoff mit einer relativ hohen Tragfähigkeit und Stabilität im Verhältnis zum Gewicht sowie zum anderen mit positiven Wärmedämmeigenschaften (BELOUTTAR et al., 2009). Zur Verdeutlichung der mechanischen Vorteile einer Sandwichplatte kann der Sandwicheffekt herangezogen werden. Hierzu wird eine homogene, monolithische Platte mit definiertem Gewicht, fixem E-Modul, Festigkeit bzw. Steifigkeit in der Mitte der Platte halbiert. Die zwei Hälften werden mit Hilfe eines Kerns so voneinander separiert, ohne dass eine nennenswerte Gewichtszunahme zu verzeichnen ist. Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass durch ein solches Vorgehen bzw. Anwendung einer Sandwichstruktur sowohl die Steifigkeit als auch die Biegefestigkeit einer monolithischen Platte deutlich erhöht werden kann. Neben diesen

generellen Vorteilen können die Platten, je nach verwendetem Material, weitere positive Eigenschaften wie bspw. hohe thermische Beständigkeit oder gute akustische Isolierung aufweisen (ZENKERT, 1997; BARKANOV, 2006; KOSCHADE, 2011).

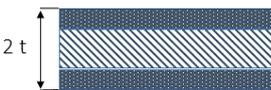
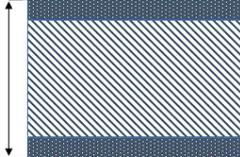
	monolithische Platte	Kernlagendicke t	Kernlagendicke $3 \cdot t$
			
Gewicht	1,0	$\sim 1,0$	$\sim 1,0$
Biegesteifigkeit	1,0	7,0	37,0
Biegefestigkeit	1,0	3,5	9,2

Abbildung 3: Steigerung der Effektivität durch Einsatz des Sandwichkonzeptes; Gewicht, Biegefestigkeit und Steifigkeit von Sandwichmaterialien im Vergleich zur monolithischen Platte (nach PETRAS, 1998).

Sandwichelemente werden entsprechend des spezifischen Verwendungszwecks, der verfügbaren Ressourcen oder der technischen Möglichkeiten kombiniert. Hierbei ist das Wissen um das Zusammenwirken der Materialien und deren Einfluss auf das Tragverhalten des gesamten Elements von Bedeutung (KOSCHADE, 2011). Das ausschlaggebende Kriterium für die Materialauswahl ist jedoch die Verwendung und damit einhergehend die Belastungsart des Bauelements. Für die Beschichtung eignen sich Leichtmetalle wie dünne Aluminium- oder Stahlbleche, Holzwerkstoffe wie bspw. Dünn-Spanplatten oder Sperrhölzer sowie kunststoffverstärkte Papierlamine. Der Kern des Elements sollte aus einem homogenen oder strukturierten Material aufgebaut sein. Eine homogene Kernstruktur kann aus verschiedenen Schaumfüllungen wie bspw. aufgeschäumten Kunststoffen (Polyurethan oder Polyvinylchlorid) oder Aluminium- bzw. Magnesiumschäumen, aber auch aus Leichthölzern gebildet sein. Für strukturierte Kerne können dagegen Phenolharz gestärktes Faserpapier oder auch Leichtmetalle in Waben-, Wellen- oder Stegstruktur zum Einsatz kommen (AICHER, 1984).

Zusammenfassend kann ein dreischichtiges Sandwichelement allgemein wie folgt beschrieben werden:

- Ein Sandwichelement besteht aus zwei steifen Deckschichten und einem leichten und schubfesten Kern.
- Die Deckschichten nehmen sämtliche Biegespannungen auf, da die Kernlage keine Spannungen übertragen kann.

- Die Wirkung von Querkraften und ein niedriger Schubmodul bewirken eine erhebliche Schubverformung im Inneren der Platte; die Wirkung der Schubspannungen in den Deckschichten kann vernachlässigt werden.
- Der Kern hat die Aufgabe die Deckschichten gegen äußere Einflüsse zu stabilisieren.

2.3.3 Bruchverhalten von Sandwichplatten

Ein Sandwichelement muss so konstruiert werden, dass es die Fähigkeit besitzt, Lasten aufzunehmen ohne dabei nach einer der bekannten Versagensarten nachzugeben. Die Kombination von zu schwachen Deckschichten bzw. Kernmaterialien oder unzureichenden Verbindungstechniken sowie die Art der einleitenden Last haben einen großen Einfluss auf die Sandwichstrukturen und können sehr unterschiedliche Arten des Versagens verursachen. Mit Hilfe von mathematischen Berechnungen ist es möglich an Hand der ausgewählten Materialien und deren Kenndaten die Versagensart vorherzusagen.

Das Sandwichelement wird an der schwächsten Stelle versagen oder an der Stelle, die am empfindlichsten gegenüber der eingeleiteten Kraft ist. Ein Element bei dem mehrere Versagensarten bei einer Belastung auftreten ist optimal konstruiert. Im Folgenden sollen die wichtigsten Arten des Versagens erläutert werden, wobei es sich hierbei um eine Zusammenstellung nach ZENKERT (1997) und ALLEN (1969) handelt.

- Biegebruch bzw. Versagen der Deckschichten:
Ein klassischer Biegebruch tritt auf, wenn die Normalspannungen in den Decklagen die Festigkeiten der Decklagen übersteigen und diesen nicht standhalten können. Das Versagen der Deckschichten ist materialabhängig und tritt ein, wenn die Last die Decklagenfestigkeit, also die jeweilige Höchstfestigkeit, übertrifft.
- Querschubversagen der Kernlage:
Während einer Biegebelastung ist der Kern eines Sandwichelements hauptsächlich Schubspannungen ausgesetzt, die aus den Querkraften während der Biegung resultieren. Versagt der Kern bevor die stützenden Deckschichten nachgeben, dann handelt es sich um einen Kernschubbruch. Die auftretende Beanspruchung übertrifft die Schubfestigkeit des Materials und es formt sich ein durch die Kernlage schrägverlaufender Riss.
- Decklagenknittern:
Beim Decklagenknittern handelt es sich um ein Ausbeulen der Deckschichten, das durch Druckbelastungen ausgelöst werden kann. Sollten die Druckspannungen während der Belastung die Druckfestigkeit des Mittellagenmaterials übersteigen, dann kann es zum

Ablösen der Materialien kommen. Einerseits kann eine Falte in das Kernlagenmaterial gedrückt werden, wenn die Druckfestigkeit des Kerns kleiner ist als die Zugfestigkeit vom Kern sowie der Klebefuge. Andererseits kann sich das Material ablösen und eine Beule nach außen ausbilden, wenn die Zugfestigkeit des Kerns bzw. der Klebefuge kleiner ist als die Druckfestigkeit des Kerns.

- Lokale Intrusion:

Diese Art des Versagens tritt auf, wenn einleitende Kräfte konzentriert auf die Oberfläche des Sandwichelementes aufgebracht werden, z. B. an Fittings oder Eckstößen. Durch die lokal wirkende Last kann es zur Verformung der Deckschicht und zu einem lokalen Eindruck des Kerns kommen. Dieser Fall kann vermieden werden, indem Kräfte bzw. Lasten nicht konzentriert sondern über ausreichend große Einleitungspunkte auf die Deckschicht eingeleitet werden. Dadurch ist es den Deckschichten und der Kernlage möglich sich entsprechend der eingeleiteten Kraft zu verformen.

3 Material und Methodik

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer neuen leichten Sandwichplatte unter Verwendung des nachwachsenden Rohstoffes Mais. Hierzu werden im folgenden Kapitel die eingesetzten Materialien, die Verfahrensprozesse zur Herstellung der plattenförmigen Werkstoffe sowie die anschließend durchgeführten Analysen zur Bestimmung der chemisch-physikalischen bzw. mechanisch-technologischen Eigenschaften erläutert.

3.1 Untersuchungsmaterialien

3.1.1 Popcorngranulat

Popcorngranulat mittels Mikrowellentechnologie

Mit Hilfe der Mikrowellentechnologie wird in einer Labor-Durchlauf-Mikrowelle im Biotechnikum des Büsingen-Instituts der Georg-August-Universität Göttingen Puffmais der Firma Event Depot, D-67297 Marnheim zu Popcorn expandiert. Die Mikrowellenanlage ist mit einem Förderband ausgestattet, das sich mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,6 m/min bewegt. Das expandierte Popcornmaterial wird daraufhin mittels eines Aggregates zerkleinert und anschließend mit einem Taumelsieb der Allgaier-Werke GmbH, D-73066 Uhingen von der Staub- (< 0,4 mm) sowie von der Grobfraktion (> 10 mm) befreit. Im Anschluss findet eine Separierung des gesiebten Materials in die Fraktionen < 4 mm bzw. \geq 4 mm statt.

Popcorngranulat mittels Bichsel-Verfahren

Mit Hilfe des Bichsel-Verfahrens kann Maisschrot bzw. geringwertiger Bruchmais durch einen genau abgestimmten Einsatz von Druck und überhitztem Dampf (250 °C bis 300 °C, 15 bar bis 35 bar) für den Aufschluss zu Popcorn verwendet werden. Bei diesem Verfahren werden die Partikel in einem Reaktor erhitzt und hohem Druck ausgesetzt, durch einen plötzlichen Druckabfall kann das im Korn enthaltene Wasser entweichen und das Korn bzw. der Partikel reißt auf. Mit der Verdampfung des Wassers geht gleichzeitig auch eine Verkleisterung der Stärke einher. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass das gewonnene Material sehr gleichmäßig geformt ist und nicht im Anschluss an die Herstellung aufwendig zerkleinert werden muss. Die Herstellung von Popcorn aus Bruchmais nach dem Bichsel-Verfahren erfolgt industriell und das Popcornmaterial wird von der Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, D-33332 Gütersloh zur Verfügung gestellt. Auch das Bichsel-Popcorn wird im Anschluss analog zum Mikrowellen-Popcorn von der Staub- und Grobfraktion befreit sowie in die Fraktionen < 4 mm bzw. \geq 4 mm separiert.

3.1.2 Beschichtungsmaterialien

Zur Herstellung der Sandwichplatten werden die Popcornverbunde mit Deckschichtmaterialien versehen. Bei diesen Materialien handelt es sich unter anderem um Holzspanmaterial der Firma Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, D-33332 Gütersloh sowie um Holzfasermaterial der Firma Gutex Holzfaserverplattenwerk GmbH & Co. KG, D-79761 Waldshut-Tiengen. Neben diesen Materialien werden auch plattenartige Werkstoffe als Deckschichten eingesetzt, eine genaue Übersicht der Materialien ist in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Deckschichtmaterialien zur Fertigung der Sandwichplatten

Werkstoff	Hersteller	Materialstärke
Aluminium	Novelis; Göttingen	0,5 mm bzw. 0,8 mm
Dünn-MDF	Pfeleiderer; Arnsberg	3,0 mm
Dünn-Spanplatte	Pfeleiderer; Arnsberg	3,0 mm
HPL	Pfeleiderer; Arnsberg	0,5 mm

3.1.3 Leichtbauplatten zu Referenzzwecken

Innerhalb dieser Arbeit steht die Fertigung einer leichten Sandwichplatte mit ausreichenden Festigkeitseigenschaften, wie z. B. die bereits auf dem Markt etablierten Leichtbauplatten der Firma Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG, D-59759 Arnsberg, im Vordergrund. Um die Eigenschaften der popcornbasierten Sandwichplatten einordnen zu können, werden gängige Leichtbauplatten sowie herkömmliche Spanplatten (Typ P2) der Firma Pfeleiderer zu Vergleichszwecken herangezogen und untersucht. Bei den ausgewählten Leichtbauplatten handelt es sich um das BalanceBoard, eine leichte Tischler- sowie eine Wabenplatte (vgl. Tab. 4).

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Leichtbauplatten zu Referenzzwecken (nach Pfeleiderer, 2015)

Produkt	Plattentyp	Kenndaten
Spanplatte; Pfeleiderer; Gütersloh	Rohspanplatte ClassicBoard P2	<u>Rohdichte:</u> 650 kg/m ³ <u>Dicken:</u> 10,0 mm, 19,0 mm, 25,0 mm
Deco Board Balance; Pfeleiderer; Gütersloh	Leichte Spanplatte in Anlehnung an P2	<u>Rohdichte:</u> 500 kg/m ³ ± 10 % <u>Dicke:</u> 19,0 mm bzw. 28,0 mm

Duropol-Verbundelement Furnier-Tischler SL; Pfleiderer; Arnsberg	Furnier-Tischlerplatte mit einer Mittellage aus Albasiaholz	<u>Rohdichte:</u> 370 kg/m ³ ± 10 % <u>Dicke:</u> 20,6 mm
Duropol-Verbundelement Papierwabe; Pfleiderer; Arnsberg	Papierwabenplatte in Wellstegwabenkonstruktion mit HDF-Deck	<u>Rohdichte:</u> 380 kg/m ³ <u>Dicke:</u> 27,0 mm

3.1.4 Bindemittel

Zur Herstellung der Popcornverbundplatten werden unterschiedliche Bindemittelsysteme eingesetzt und auf ihre Eignung zur Bindung von Popcorngranulat geprüft. Zum einen wird das Popcorn mit den säurehärtenden harnstoffformaldehydbasierten Harzen der Kaurit® Gruppe K 350 bzw. K 340 flüssig der BASF AG, D-67056 Ludwigshafen beleimt und zum anderen wird eine Verklebung des Materials mit einem MDI-Bindemittelsystem der Firma Huntsman bvba, BE-3078 Everberg geprüft.

3.2 Chemisch-physikalische Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien

Innerhalb dieser Dissertation erfolgt mit Hilfe chemischer Untersuchungen die Einordnung und Evaluierung der verwendeten Popcornmaterialien. Hierzu werden Mikrowellen-Popcorn sowie Bichsel-Popcorn hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften charakterisiert. Ferner sollen im folgenden Kapitel die zum Einsatz kommenden Materialien und Geräte näher erläutert sowie die grundlegenden Untersuchungen erklärt werden.

3.2.1 Siebanalyse und Schüttdichte

In Anlehnung an DIN 66165 werden die Materialien mit Hilfe einer Siebanalyse auf ihre Größenverteilung hin geprüft. Zur Durchführung der Analyse wird ein Vibrationssiebturn der Firma Retsch, D-42781 Haan verwendet. Für die durchzuführende Siebung wird eine bestimmte Menge des Materials in die Siebvorrichtung auf das oberste Sieb gegeben und für eine Dauer von 5 min mit einer Rotation von 210 U/min fraktioniert. Durch die Rotation wird das zu untersuchende Material in die Fraktionen der einzelnen Siebe, die auf einer Auffangschale gestapelt sind, aufgegliedert. Im Anschluss an die Siebung werden die Fraktionen gravimetrisch erfasst. Für die Untersuchung werden die Ausgangsmaterialien Mikrowellen- bzw. Bichsel-Popcorn sowie zu Vergleichszwecken Fichtenspanmaterial in verschiedenen Varianten analysiert (vgl. Tab. 5).

Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten Materialien und deren Fraktionierung

Material	Variante
Mikrowellen-Popcorn	Popcorn mit Feinanteil (0 mm bis 1,0 mm)
	Popcorn ohne Feinanteil (0 mm bis 1,0 mm)
	Popcorn < 4,0 mm
	Popcorn ≥ 4,0 mm
Bichsel-Popcorn	Popcorn mit Feinanteil (0 mm bis 2,0 mm)
	Popcorn ohne Feinanteil (0 mm bis 2,0 mm)
	Popcorn < 4,0 mm
	Popcorn ≥ 4,0 mm
Fichtenspanmaterial	Deckschichtspäne
	Mittelschichtspäne

In weiteren Untersuchungen wird in Anlehnung an DIN EN 12580 die Schüttdichte der zuvor mittels Siebanalyse untersuchten Materialien bestimmt. Die Schüttdichte gibt das Verhältnis der Masse eines locker aufgeschütteten Materials zu dessen eingenommenen Volumen an.

$$\text{Schüttdichte in g/l} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Dabei ist:

- m = Gewicht der Probe (atro) in g
V = Volumen des Meßzylinders in l

3.2.2 Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität

Neben der Dichte sind auch die chemischen Eigenschaften der verwendeten Materialien für die Werkstoffherstellung von Bedeutung, daher wird mittels einer Extraktion der pH-Wert sowie die Pufferkapazität von diesen bestimmt. Zur Durchführung dieser Analyse werden 5 g atro Probenmaterial mit 150 ml bidestilliertem Wasser versetzt und für eine Zeitspanne von 24 h bei Raumtemperatur (etwa 20 °C) und 120 rpm gerüttelt. Anschließend werden die Extrakte unter Verwendung von gedarrten Fritten abfiltriert. Die wässrigen Auszüge werden direkt zur Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität herangezogen. Zur Ermittlung der Pufferkapazität werden die gewonnenen Filtrate mittels eines Titrometers der Firma Schott, D-55122 Mainz analysiert. Hierzu werden jeweils 20 ml der Lösungen mit einer 0,01 molaren NaOH-Lösung bis zum neutralen pH-Wert 7 titriert. Mit Hilfe der verbrauchten Menge NaOH-Lösung kann anschließend die Pufferkapazität, unter Berücksichtigung folgender Beziehung: 1 ml der

0,01 molaren Lauge NaOH entspricht einer Pufferkapazität von 1,5 mmol NaOH/100 g atro Material, ermittelt werden.

3.2.3 Proteinbestimmung mittels der Kjeldahl-Methode

Mit Hilfe der Kjeldahl-Methode nach DIN EN 25 663 ist es möglich den Proteingehalt im Probenmaterial nachzuweisen. Hierzu erfolgt zuerst die Bestimmung des Stickstoffgehaltes und anschließend kann mit Hilfe einer Umrechnung auf den Proteingehalt geschlossen werden. Die genaue Kenntnis über den Proteingehalt im Probenmaterial ist dahingehend von Bedeutung, da zum einen Proteine eine hohe Reaktivität gegenüber Formaldehyd aufweisen und zum anderen für ein umweltfreundliches Recycleverfahren der Verbundplatten am Ende der Nutzungsphase eine Rolle spielen.

Der erste Arbeitsschritt dieser Methode ist ein Kochprozess, bei dem das Probenmaterial unter Verwendung von Schwefelsäure gekocht wird. Dieser Schritt bewirkt, dass die stickstoffhaltigen Verbindungen (Proteine, Amine sowie andere org. Verbindungen) in Ammoniumverbindungen überführt werden. Anschließend erfolgt eine Destillationsphase, in der der Aufschluss mit einer alkalischen Lösung und bidestilliertem Wasser versetzt wird. Dieser Vorgang hat die Freisetzung und Auswaschung von Ammoniak zum Ziel. Abschließend wird das entstandene Destillat auf einen definierten pH-Wert titriert, so dass mit Hilfe der verbrauchten Titrationslösung auf den Stickstoffgehalt geschlossen werden kann. Zur Umrechnung des Stickstoffgehaltes in den Proteingehalt wird der Faktor 6,25 verwendet.

Aufschluss

Für diesen Arbeitsschritt werden ca. 2 g des zu untersuchenden Materials in die für den Aufguss bestimmten 400 ml umfassenden Gefäße gegeben. Den Proben werden zwei Kjeltabs des Typs CT zur Katalysierung der Reaktion und jeweils 25 ml Schwefelsäure hinzugefügt. Im Anschluss werden die Glasgefäße in den auf 300 °C vorgeheizten Heizblock der Apparatur Kjeldahltherm KB/KBL der Firma Gerhardt, D-53639 Königswinter gestellt und für eine Dauer von 45 min bei 300 °C gekocht. Anschließend wird die Temperatur auf 400 °C erhöht bis sich eine Grünfärbung der Proben einstellt. Nach dem Farbwechsel wird die Kochung für weitere 90 min fortgeführt, so dass alle Bestandteile mit Sicherheit aufgeschlossen sind. Daraufhin wird die Lösung auf Zimmertemperatur abgekühlt.

Destillation

Die abgekühlten Proben werden mit Hilfe der Destillationsapparatur Vapodest 30 der Firma Gerhardt, D-53639 Königswinter automatisch destilliert. Für diesen Arbeitsschritt wird zunächst 30 ml bidest. Wasser in ein Becherglas (250 ml) gegeben, in dem das spätere Destillat

aufgefangen wird. Für die Destillation wird ein spezielles Programm verwendet: Bevor die Destillation beginnt, werden die Proben für neun Sekunden mit bidest. Wasser gespült, anschließend erfolgt für vier Sekunden die Zugabe von Natronlauge (32 %). Hierdurch wird der im Untersuchungsmaterial enthaltene Ammoniak frei. Abschließend folgt der Destillationsprozess, um den Ammoniak in ein mit 50 ml Borsäure (4 %) gefülltes Becherglas (250 ml) zu überführen und aufzufangen.

Titration

Als letzter Arbeitsschritt erfolgt die Titration, hier werden die aufgefangenen Lösungen mit Hilfe der Titrationsapparatur Titro Line Easey der Firma Schott, D-55122 Mainz auf einen definierten pH-Wert von 5,2 unter Verwendung von 0,05 M Schwefelsäure titriert. An Hand der benötigten Schwefelsäure wird der Stickstoffgehalt der Proben unter Berücksichtigung folgender Formel berechenbar:

$$\text{Stickstoffgehalt in g} = \frac{a \cdot 1,4008}{E} \quad (3)$$

Dabei ist:

- a = Benötigte Schwefelsäure in ml
- E = Probenmaterial in mg

3.2.4 Bestimmung des Formaldehydabsorptionsvermögens

Proteinhaltige Strukturen sind in der Lage Formaldehyd langfristig zu binden. Da Mais über einen gewissen Proteinanteil verfügt, soll geprüft werden, ob es zu einer Wechselwirkung zwischen Popcorngranulat und Formaldehyd kommt. Um diese näher zu bestimmen, wird das Material gasförmigem Formaldehyd ausgesetzt. Das Formaldehydabsorptionsvermögen der Materialien kann ermittelt werden, indem die zu untersuchenden Materialien (Popcorngranulat und zu Vergleichszwecken Fichtenholzspäne bzw. Holzfasern) für definierte Zeiten bei verschiedenen Temperaturen gasförmigem Formaldehyd ausgesetzt werden (Zeit: 1,0 h, 2,0 h und 3,0 h; Temperatur: 20 °C, 30 °C, 50 °C, 70 °C sowie 103 °C). Hierzu werden jeweils 3 g (atro) Material in handelsübliche Tee-Eier gegeben. Die Tee-Eier werden verschlossen und in verschließbare Metallzylinder, die zuvor mit 50 ml einer 37 %-igen Formaldehydlösung gefüllt werden, gehängt. Die Zylinder werden anschließend für die definierte Dauer in einen Trockenschrank gestellt. Nach Ablauf der Zeit werden die Tee-Eier bis zur Gewichtskonstanz gedarrt und es erfolgt eine gravimetrische Gewichtsbestimmung der Proben. Anhand der ermittelten Gewichtszunahme des Probenmaterials kann das prozentuale Absorptionsvermögen der Materialien berechnet werden.

3.2.5 Bestimmung der Sorptionseigenschaften

Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Ausgleichsfeuchte sowie die Überprüfung, ob Popcorngranulat bzw. die gefertigten Popcornverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3) ein ähnliches Sorptionsverhalten aufweisen wie Holz bzw. Holzwerkstoffe. Hierzu werden jeweils 8 Prüfkörper (vgl. Kap. 3.4.1, Versuchsreihe III) im Klimaschrank (Binder GmbH, D-78532 Tuttlingen) bei 20 °C und $65 \text{ % rel. Luftfeuchtigkeit}$ konditioniert und anschließend unterschiedlich hohen rel. Luftfeuchten ausgesetzt, wobei die Umgebungstemperatur konstant bei 20 °C gehalten wird. Zu Beginn wird durch eine stufenweise Herabsenkung der rel. Luftfeuchtigkeit die Adsorption untersucht, um anschließend durch eine Erhöhung der Luftfeuchte die Desorption zu bestimmen. Die rel. Luftfeuchtigkeit wird von 65 % auf 50 % , dann weiter auf 40 % , 30 % und 25 % reduziert und anschließend von $30 \text{ % rel. Feuchte}$ jeweils in 10 % Schritten auf 80 % und schließlich auf 85 % wieder erhöht. Die jeweilige Klimastufe wird beim Erreichen der Gewichtskonstanz umgestellt und für jedes Klima wird die Ausgleichsfeuchte des Materials bzw. der Werkstoffe bestimmt. Hierbei gilt die Gewichtskonstanz als erreicht, wenn zwei hintereinanderliegende Messungen im Zeitraum von 24 h maximal um $0,1 \text{ %}$ voneinander abweichen. Die Ausgleichsfeuchte einer Variante für ein definiertes Klima stellt die gravimetrisch ermittelte Feuchte der Proben dar.

3.2.6 Bestimmung der Dimensionsstabilität und Feuchteaufnahme bei definierten Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeiten

Die Bestimmung der Dimensionsstabilität erfolgt in Anlehnung an EN 1604 und ausschließlich an Prüfkörpern von Popcornverbundplatten. Die Prüfkörper werden bei 20 °C und $65 \text{ % rel. Luftfeuchte}$ klimatisiert und anschließend werden die Einflüsse der rel. Luftfeuchte sowie der Temperatur auf die Maße und das Gewicht der Prüfkörper bestimmt. Ziel dieser Untersuchung ist es, festzustellen wie sich die Parameter Temperatur und Luftfeuchte auf das Popcorn auswirken und ab wann eine Veränderung des Materials auftritt. Hierzu werden die Prüfkörper für eine Zeitspanne von 96 h einem bestimmten Klima ausgesetzt und in 24 stündigen Abständen vermessen, so dass die tägliche Veränderung der Prüfkörper aufgezeichnet werden kann. Zur Überprüfung der Dimensionsstabilität werden mit Hilfe eines Klimaschranks unterschiedliche Klimata eingestellt (vgl. Tab. 6). Bei jeder Messung werden die Dicken-, Längen- sowie Breitenänderungen sowie die Gewichtsänderungen der Prüfkörper aufgenommen.

Tabelle 6: Parameter zur Überprüfung der Dimensionsstabilität der Verbundplatten bei definierten Temperaturen (°C) bzw. rel. Luftfeuchten (%)

Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %
25	75
30	80
35	82
	85

3.2.7 Bestimmung der Formaldehydemissionen in der Holzwerkstoffindustrie

Formaldehydemissionen aus Holzwerkstoffen können unter Anwendung verschiedener Prüfverfahren, wie beispielsweise der Kammer- (DIN EN 717-1), Flaschen- (DIN EN 717-3) Gasanalyse- (DIN EN 717-2) oder Perforatormethode (DIN EN 120) bestimmt werden. In Europa ist die Prüfkammermethode nach DIN EN 717-1 als Referenzverfahren für die Erstprüfung ausschlaggebend, wonach Formaldehydemissionen von Holzwerkstoffen einen Grenzwert von 0,1 ppm (0,124 mg/m³ Raumluft) nicht überschreiten dürfen (MARUTZKY, 2012). Da dieses Verfahren sehr aufwendig ist, erfolgt die Produktionskontrolle an Holzwerkstoffen hingegen mit abgeleiteten Methoden, wie der Perforator- und der Gasanalysemethode. Die in dieser Arbeit durchgeführten Verfahren sollen im Folgenden näher erläutert werden.

3.2.7.1 Bestimmung der Formaldehydemissionen nach der 1 m³-Prüfkammermethode

Die Formaldehydemissionen der Verbundplatten aus Versuchsreihe IV.a (vgl. Kap. 3.4.1) werden in einer 1 m³ großen Prüfkammer gemessen. Hierzu werden die zu untersuchenden Platten mit einer Oberfläche von 1 m² pro 1 m³ Kammervolumen mittig in die Prüfkammer gehängt. In der gesamten Untersuchungsphase müssen konstante Bedingungen in den Kammern herrschen (vgl. Tab. 7).

Tabelle 7: Prüfparameter während der Durchführung der Kammermethode (DIN EN 717-1)

Temperatur	23,0 (± 0,5) °C
Relative Luftfeuchtigkeit	45 (± 3) %
Luftwechselzahl	1,0 (± 0,5) pro h
Luftgeschwindigkeit	0,1 bis 0,3 m/s

Bevor die Platten in die Kammern gegeben werden, müssen die Kanten mit Aluminiumklebeband versiegelt werden, hierbei soll das Verhältnis zwischen den offenen Kanten U zur Oberfläche A 1,5 m/m² betragen. Anschließend werden täglich mittels eines Gasprobennehmers des Typs GS 412 der Firma Desaga, D-51588 Nümbrecht Proben entnommen. Hierzu werden 300 l der Kammerluft durch zwei zuvor mit 20 ml bidest. Wasser befüllte Waschflaschen geleitet. Das Wasser absorbiert die von den Platten abgegebenen Formaldehydemissionen aus dem Luftstrom.

Nach Ablauf der Luftprobennahme wird die Lösung in den Waschflaschen nach dem Acetyl-Aceton-Verfahren analysiert und nach folgender Gleichung die Formaldehydemission berechnet:

$$\text{Formaldehydabgabe in mg/m}^3 = ((A_S - A_B) * f * V) / V \quad (4)$$

Dabei ist:

- A_S = Extinktion der Lösung
- A_B = Extinktion des Blindwertes
- f = Steigungsfaktor in mg/ml
- V = Volumen der Absorptionslösung in ml

3.2.7.2 Bestimmung der Formaldehydabgabe nach der Gasanalysemethode

Nach DIN 717-2 werden Prüfkörper mit einer definierten Oberfläche in eine abgedichtete und auf 60 °C vorgeheizte Kammer mit definiertem Klima (Feuchte, Luftdurchsatz, Druck) gegeben. Die Prüfkörper werden innerhalb der Gaskammer bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 2 % von aufgewärmter Luft umströmt und geben an die Umgebung Formaldehyd ab. Der abgegebene Formaldehyd wird im Stundenintervall durch hintereinandergeschaltete Gaswaschflaschen (pro Stunde zwei miteinander verbundene Waschflaschen mit je 30 ml bidest. Wasser) geleitet und vom Wasser absorbiert. Nach Ablauf der Prüfung wird der Inhalt der zusammengehörigen Waschflaschen in einen 250 ml umfassenden Kolben gegeben und auf 250 ml mit bidest. Wasser aufgefüllt. Anschließend wird die Menge an Formaldehyd, die in der Lösung enthalten ist, mit Hilfe des Acetyl-Aceton-Verfahrens bestimmt.

$$\text{Formaldehydgehalt in mg/m}^2 = \frac{(A_S - A_B) * f * V}{F} \quad (5)$$

Dabei ist:

- A_S = Extinktion der Lösung in den Gaswaschflaschen
- A_B = Extinktion des Nullwertes
- f = Steigungsfaktor in mg/ml
- V = Meßkolbenvolumen in ml
- F = nicht abgeklebte Gesamtoberfläche des Prüfkörpers in m²

3.2.7.3 Bestimmung des Einflusses von Temperatur und rel. Luftfeuchte auf die Formaldehydabgabe der Verbundplatten

Um den Einfluss eines definierten Klimas auf die Formaldehydabgabe zu untersuchen, wird bei dieser Untersuchung die DIN EN 717-3 in modifizierter Ausführung angewendet. Das Klima wird mit Hilfe von gesättigten wässrigen Salzlösungen (35 % RH = Magnesiumchlorid; 75 % RH = Natriumchlorid; 85 % RH = Kaliumchlorid, 100 % RH = Wasser) und einer kontrollierten Temperatur (30 °C sowie 40 °C) eingestellt. Hierzu werden Prüfkörper innerhalb eines geschlossenen Behälters (500 ml), in dem zuvor der Luftfeuchte entsprechende Salzlösung

(50 ml) gegeben wurde, gehängt und anschließend verschlossen. Nach Ablauf eines definierten Zeitraums (vgl. Tab. 8) werden die Prüfkörper dem Behälter entnommen und die Lösung wird entsprechend der Acetyl-Aceton-Methode analysiert.

Tabelle 8: Parameter zur Bestimmung der Formaldehydabgabe

Bedingungen	Modifizierte DIN EN 717-3	DIN EN 717-3
Temperatur	30 °C, 40 °C	40 °C
Rel. Luftfeuchte	35 %, 75 %, 85 %, 100 %	100 %
Zeitraum	24 h, 48 h, 96 h	24 h

3.3 Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften

Die entwickelten Verbund- und Sandwichplatten werden hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht und evaluiert. Im folgenden Kapitel werden die entsprechenden Prüfverfahren zur Bestimmung der Platteneigenschaften dargestellt. In Anlehnung an die jeweiligen Normen werden die Prüfkörper vorbereitet und die Prüfungen durchgeführt.

3.3.1 Bestimmung der Rohdichte und des Rohdichteprofiles (DIN EN 323)

Die Rohdichte eines Werkstoffes wird als Verhältnis zwischen Masse und Volumen definiert und in kg/m^3 angegeben. Entsprechend der DIN EN 323 werden jeder Platte nach dem Zufall 10 Proben entnommen, um anschließend an diesen die Rohdichte zu bestimmen. Neben der Rohdichte wird von jeder Platte ebenfalls ein Rohdichteprofil, unter Verwendung des Labor-Dichtemessgerätes DA-X (Fa. GreCon, D-31042 Alfeld-Hannover), erstellt. Mit Hilfe von Röntgenstrahlen wird dabei der Dichteverlauf über den Dickenquerschnitt in den Platten gemessen.

3.3.2 Bestimmung der Querkzugfestigkeit (DIN EN 319)

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene wird gemäß DIN EN 319 bestimmt. Hierzu werden quadratische Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 50 mm zugeschnitten und auf Holz-Joche geklebt. Nach einer Konditionierungsphase werden die Prüfkörper mittels einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick/Roell, D-89079 Ulm bis zum Bruch belastet. Eine gleichmäßig verteilte Zugkraft wirkt am Prüfkörper, wobei die Belastungsgeschwindigkeit konstant ist und der Bruch innerhalb von $60 (\pm 30 \text{ s})$ s erreicht wird. Die Zugfestigkeit der Prüfkörper errechnet sich aus der Bruchkraft und der Oberfläche des Prüfkörpers.

$$\text{Querzugfestigkeit in } N/mm^2 = \frac{F_{max}}{A} \quad (6)$$

Dabei ist:

F_{max} = Bruchkraft in N

A = Querschnittsfläche (Länge x Breite) des Prüfkörpers in mm^2

3.3.3 Bestimmung des Schraubenausziehwerstandes (DIN EN 320)

Die Bestimmung des Schraubenausziehwerstandes erfolgt, indem die notwendige Kraft für das Herausziehen von Schrauben aus den Oberflächen sowie den Seitenkanten von Prüfkörpern gemessen wird. Hierzu werden in quadratischen Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 75 mm Schrauben mit definierten Maßen (DIN EN 320) in vorgebohrten Löchern 19 mm tief eingeschraubt. Die so präparierten Prüfkörper werden an einer Schraube in die Prüfmaschine eingehängt und senkrecht zur Aufbringung mit einer kontinuierlichen Kraft bis zum Ausziehen belastet.

3.3.4 Analytische Evaluierung von Sandwichplatten mittels Biegeprüfung

3.3.4.1 Terminologie

Im Bereich der Holzwerkstoffe und der leichten Verbundwerkstoffe sind, um deren Biegeverhalten zu beschreiben, viele unterschiedliche Abkürzungen und Indizes in Gebrauch. In dieser Arbeit werden zur Evaluierung der Sandwichplatten die beiden Normen DIN EN 310 und DIN 53 293 verwendet, die jeweils unterschiedliche Begriffe und Abkürzungen aufführen. Die in dieser Arbeit eingesetzten Abkürzungen orientieren sich an der DIN 53 293 und werden hier kurz beschrieben (vgl. Abb. 4 und Tab. 9).

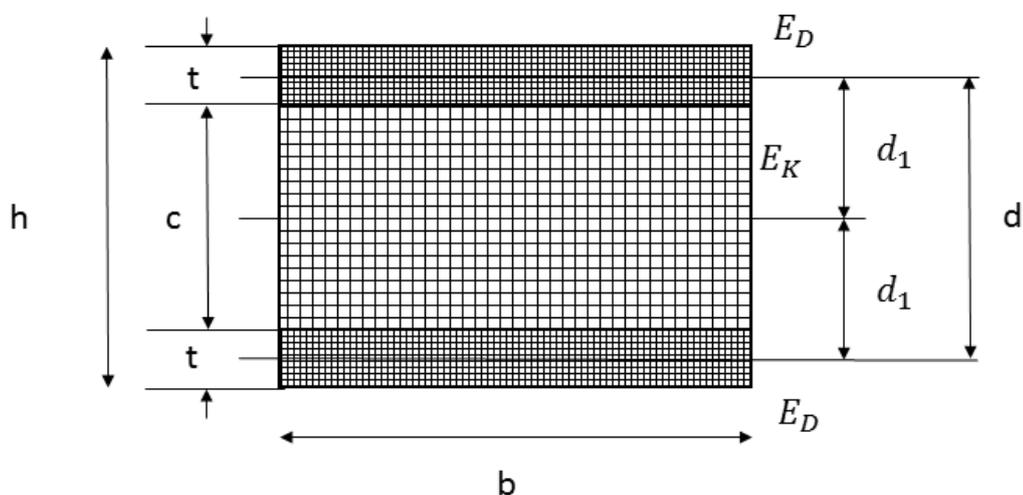


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Sandwichplatte mit den verwendeten Abkürzungen nach DIN 53 293.

Tabelle 9: Übersicht der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Begrifflichkeiten
E_D	E-Modul der Deckschicht
E_K	E-Modul der Kernlage
h	Plattendicke
b	Plattenbreite
t	Deckschichtdicke
c	Kernschichtdicke
d	Abstand zwischen den Schwerpunkten der Deckschichten
d_1	Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Deckschicht und dem Gesamtschwerpunkt der Platte

3.3.4.2 Biegeprüfung mittels 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

Leichtbauplatten unterscheiden sich von herkömmlichen monolithischen und isotropen Werkstoffen wie bspw. der Spanplatte im Aufbau sowie im Verhalten unter Belastung. Die mechanischen Eigenschaften dieser häufig 3- bzw. 5-schichtigen, aus verschiedenen Materialien zusammengesetzten Verbundplatten sind durch viele Faktoren beeinflussbar. Daher handelt es sich bei einer Leichtbauplatte nicht mehr um einen homogen aufgebauten Werkstoff und demnach ist die Bestimmung der Biegefestigkeit bzw. Steifigkeit an nicht homogene Platten anzupassen. Bisher werden konventionelle Werkstoffe mit Hilfe der klassischen 3-Punkt-Biegeprüfung auf ihre Biege- und Steifigkeitseigenschaften hin untersucht. Hierzu wird nach EN 310 der Werkstoff bis zum Bruch belastet, um anschließend aus dem Verhältnis Kraft (F_{max}) und Verformung (w) die Parameter Biege-E-Modul (E) und Plattensteifigkeit ($E \cdot I$) sowie Biegespannungen (σ) zu bestimmen. Die EN 310 bezieht sich auf monolithische, isotrope Vollquerschnitte, deren Biegespannungen linear über den gesamten Querschnitt verlaufen (vgl. Abb. 5). Demnach ergeben sich für homogene Materialien Biegespannungen bzw. Biegefestigkeiten aus dem Verhältnis Bruchmoment (M) zu Widerstandsmoment (W) eines Vollquerschnitts nach Gleichung (7) sowie Biegesteifigkeiten aus E-Modul und Flächenträgheitsmoment der Platten nach Gleichung (8) (DIN EN 310, 1993):

$$\text{Biegespannung in N/mm}^2: \quad \sigma = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (7)$$

$$\text{Biegesteifigkeit in Nmm}^2: \quad E \cdot I = E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (8)$$

(Herleitung der Gleichungen vgl. Kap. 10.1)

Dagegen besteht bei einem mehrschichtigen Plattenverbund die Notwendigkeit die Einzelbiegesteifigkeiten der Materialien zu berücksichtigen. Nach Wiedemann (2006) ergibt sich für die Biegesteifigkeit einer dreischichtigen Sandwichverbundplatte Gleichung (9):

$$\text{Biegesteifigkeit in Nmm}^2: \quad (E * I)_{eff} = E_K \frac{b * c^3}{12} + 2 * E_D * \left(\frac{b * t^3}{12} + b * t * \left(\frac{h-t}{2} \right)^2 \right) \quad (9)$$

(Herleitung der Gleichung vgl. Kap. 10.1)

Die Steifigkeit eines Werkstoffes wird aus der Gesamtverformung während einer Biegebelastung abgeleitet. Eine solche Verformung besteht aus Biege- sowie Schubverformung. Zur Minimierung des Schubeinflusses wird in der EN 310 auf das Einhalten eines Stützweitenabstands l_1 in Anhängigkeit der Plattendicke verwiesen. Der Grund für diese Vorgabe ist, dass mit wachsendem Verhältnis von Stützweite zu Plattendicke der Einfluss der Schubverformung deutlich verringert werden kann. Die so für homogene Werkstoffe ermittelten Daten können somit als unabhängig und aussagekräftig angesehen werden (vgl. Abb. 6).

Diese Unabhängigkeit der Daten ist für mehrschichtige Werkstoffe, die aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammengesetzt sind, bei Anwendung der EN 310 nicht mehr gegeben. Auf Grund des geschichteten Aufbaus aus steifen Deckschichten und schubschwachem Kernmaterial ist es nicht mehr möglich von einem homogenen Plattenaufbau, dessen Spannungen gleichmäßig über den Plattenquerschnitt verlaufen, zu sprechen. Es ist vielmehr so, dass die aus Biegung resultierenden Spannungen (Zug- bzw. Druckspannungen) hauptsächlich in den Deckschichten auftreten und hier gleichmäßig verteilt sind. Biegespannungen entstehen auch im Kernbereich, diese können jedoch auf Grund des geringen Anteils vernachlässigt werden (vgl. Abb. 5).

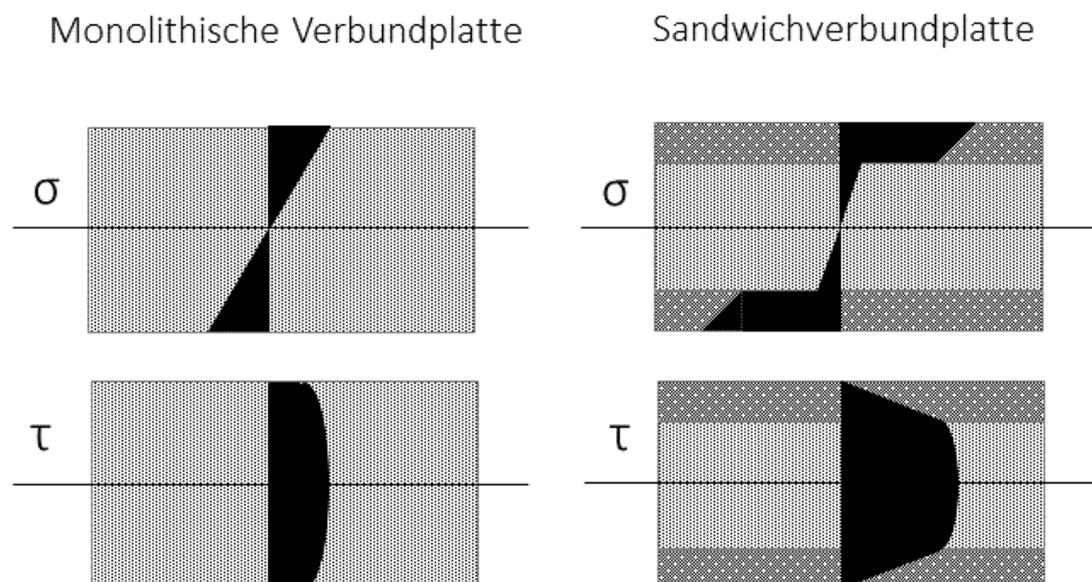


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung (oben: Biegespannung; unten: Schubspannungen) innerhalb einer monolithischen Verbundplatte sowie einer Sandwichverbundplatte unter Biegebelastung (nach KLEIN, 2001; nach WAGENFÜHR und WAGENFÜHR, 2008).

Die Gesamtverformung einer Sandwichplatte wird neben der Biegeverformung auch durch Schubverformung verursacht. Diese Schubeinflüsse sind hauptsächlich im Bereich der Kernlage zu finden. Aus diesem Sachverhalt geht hervor, dass Kenndaten bzw. Angaben zu E-Modulen von Sandwichplatten, ermittelt nach der EN 310, nicht korrekt sind. Die ermittelten E-Module sind fehlerhaft, da diese aus dem Trägheitswiderstand eines homogenen Vollquerschnittes abgeleitet werden. Die erhobenen Daten wären nur für einen bestimmten Belastungsfall repräsentativ und nicht auf andere statische Systeme übertragbar. Durch eine Veränderung des Belastungssystems würden sich jedes Mal die charakteristischen Werte (E-Modul, Biegefestigkeit bzw. Biegespannung) verändern. Diese Aussage wird graphisch durch die Abbildungen 6 und 7 von EIERLE et al. (2008) sowie durch Untersuchungen von POPPENSIEKER und THÖMEN (2005) an Papierwabenplatten bestätigt. Die Abbildungen verdeutlichen, dass die aus Biegebelastung resultierenden Schubverformungen bei Spanplatten nach EN 310 nur einen geringen Anteil an den Gesamtverformungen besitzen und dass zudem die ermittelten E-Moduln bei Einhaltung des nach DIN geforderten Verhältnisses von Stützweite und Plattendicke durch Veränderung des Systems nicht variieren. Hingegen besitzen die Schubverformungen von Papierwabenplatten unter Biegebelastung einen enormen Anteil an den Gesamtverformungen und es wird deutlich, dass bei Veränderung des Verhältnisses von Stützweite zu Plattendicke auch die E-Moduln betroffen sind (vgl. Abb. 7).

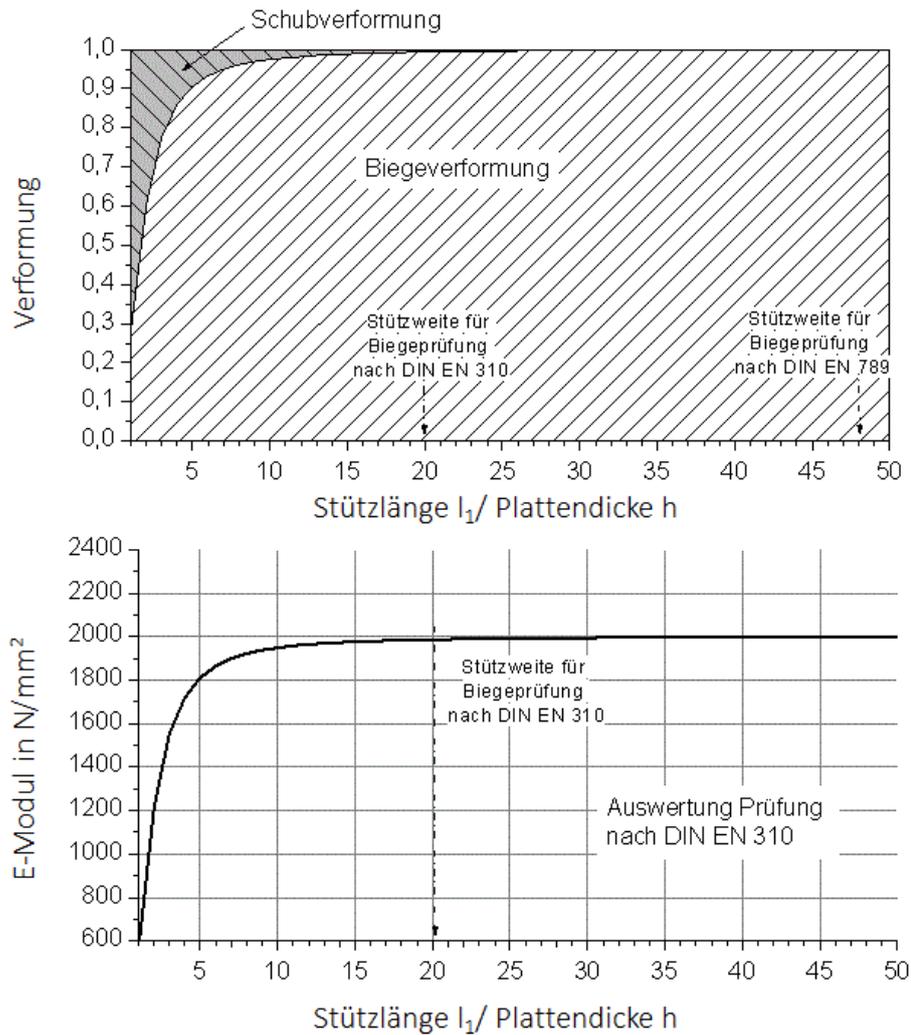


Abbildung 6: Oben: Darstellung der Schub- sowie Biegeverformung an der Gesamtverformung einer Spanplatte, verursacht durch Biegebelastung im 3-Punkt-Versuch nach EN 310. Unten: Einfluss der Stützweite auf den E-Modul, ermittelt nach EN 310 (nach EIERLE et al. 2008).

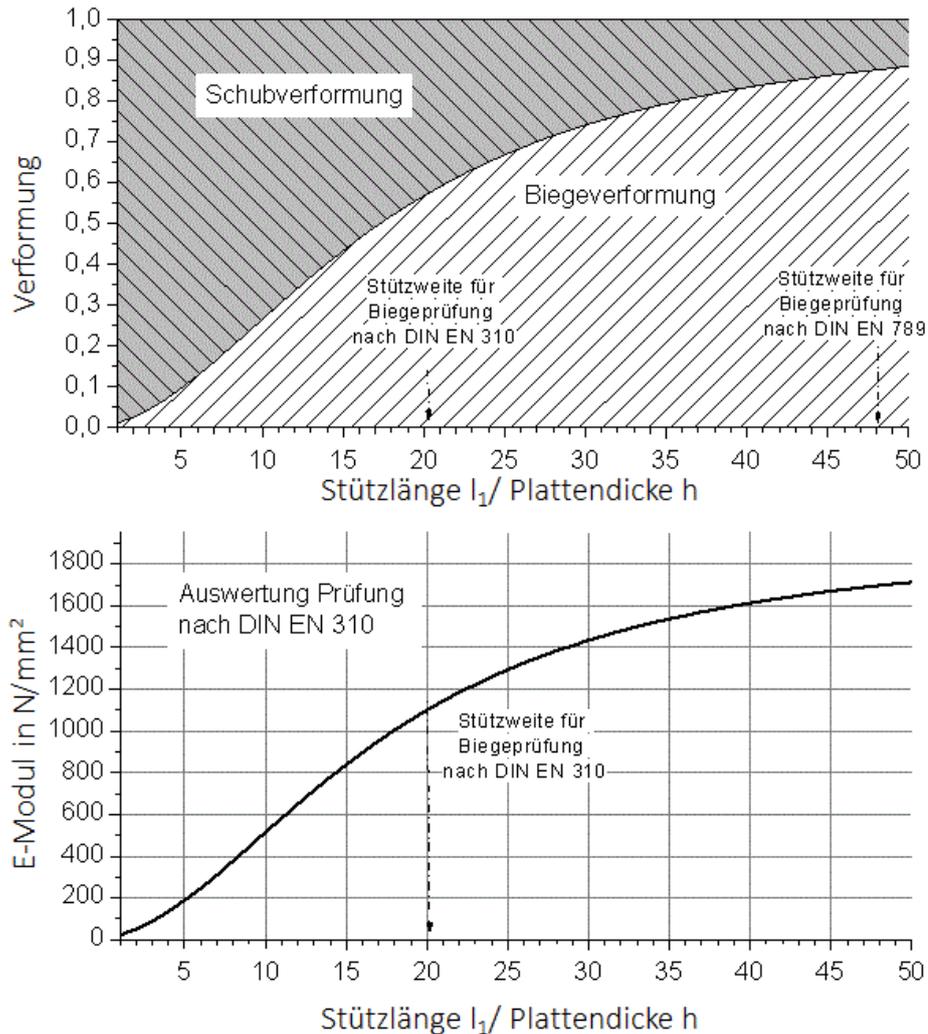


Abbildung 7: Oben: Darstellung der Schub- sowie Biegeverformung an der Gesamtverformung einer Papierwabenplatte, verursacht durch Biegebelastung im 3-Punkt-Versuch nach EN 310. Unten: Einfluss der Stützweite auf den E-Modul, ermittelt nach EN 310 (nach EIERLE et al. 2008).

Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen, dass leichte Sandwichplatten nicht wie herkömmliche Werkstoffe beurteilt werden können. Daher ist es dringend notwendig Möglichkeiten zu diskutieren, mit denen eine Beurteilung und Vergleichbarkeit von Sandwichplatten mit anderen Werkstoffen möglich ist. Eine Möglichkeit die Sandwichplatten zu beurteilen, stellt die Anwendung der 4-Punkt-Biegeprüfung nach DIN 53 293 dar. Bei dieser Prüfungsmethode wird eine Kraft über zwei linienförmige Krafteinleitungspunkte auf einen Prüfkörper bis zum Bruch aufgebracht. Der Vorteil dieser Prüfung liegt in der getrennten Erfassung der Schub- und Biegeverformung. Die getrennte Erfassung wird durch einen querkraftfreien Bereich zwischen den Krafteinleitungspunkten realisiert (vgl. Abb. 8)

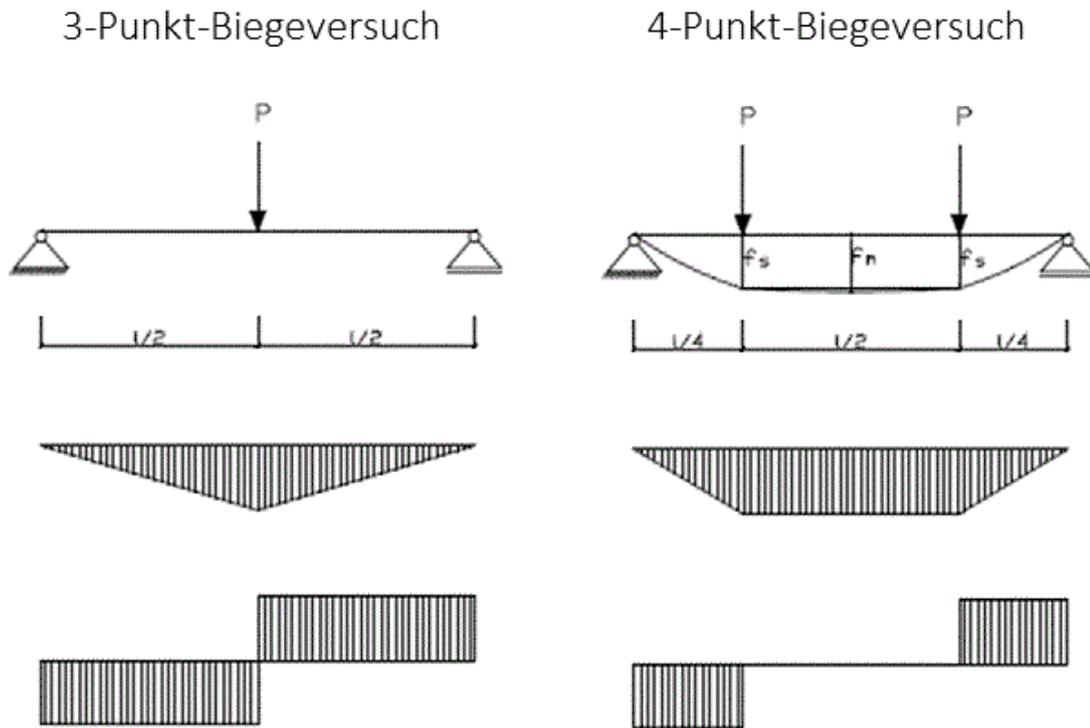


Abbildung 8: Gegenüberstellung des Bruchmoments und des Querkraftverlaufs bei der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung (nach WAGNER und ERLHOF, 1991).

Mit Hilfe der 4-Punkt-Biegeprüfung kann durch die Ermittlung der reinen Biegung die effektive Biegesteifigkeit des Verbundwerkstoffes bestimmt werden. Für die Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeit werden die Biegesteifigkeiten der beiden Deckschichten sowie der Kernschicht berücksichtigt (vgl. Gleichung 9). Neben den Eigenbiegesteifigkeiten fließt zusätzlich der Steineranteil (Erläuterung des Steineranteils vgl. Kap. 10.1) der Deckschichten mit in die Berechnung ein. Bei der Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeiten können die Eigenbiegesteifigkeiten der Deckschichten sowie des Kerns vernachlässigt werden, wenn nach DIN 53 293 deren Anteil an der Gesamtsteifigkeit des Plattenverbundes nicht größer als 1 % ist. Es gilt die Eigenbiegesteifigkeiten können vernachlässigt werden, wenn

$$\frac{d}{t} \geq 5,8 \quad \text{sowie} \quad \frac{E_D * t}{E_K * c} * \left(\frac{d}{c}\right)^2 \geq 16,7$$

sind.

Neben der Biegesteifigkeit wird mit Hilfe der Schubverformung die effektive Schubsteifigkeit des Werkstoffes abgeleitet. Für die Ermittlung der Schubsteifigkeit finden die Schubsteifigkeiten der einzelnen Schichten (Kern- bzw. Deckschichten) sowie der Klebefuge Berücksichtigung. Hierbei wird angenommen, dass die Schubsteifigkeit der Deckschichten deutlich höher ist als die der Kernlage.

Nach DIN 53 293 können die zwei folgenden Verallgemeinerungen getroffen werden:

- Die aus der Biegebelastung resultierende Biegespannung σ der Sandwichplatte entspricht den Zug- bzw. Druckspannungen in den Deckschichten.
- Die ermittelte Schubsteifigkeit der Platte gibt die Steifigkeit des Kernmaterials wieder.

Im Folgenden werden die erfassten und abgeleiteten Parameter aus der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung (EN 310 bzw. DIN 53 293) gegenübergestellt.

Tabelle 10: Erfasste und abgeleitete Parameter nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

3-Punkt-Biegeprüfung nach EN 310	4-Punkt-Biegeprüfung nach DIN 53 293
<u>Erfasste Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> • Kraft am Lasteinleitungspunkt F_{\max} • Verformung des Prüfkörpers am Einleitungspunkt ω 	<u>Erfasste Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> • Kraft an den Lasteinleitungspunkten F_{\max} bzw. $F_{\max}/2$ • Verformung in der Mitte des Prüfkörpers, also zwischen den Einleitungspunkten • Verformung an den jeweiligen Lasteinleitungspunkten im Verhältnis zur Kraft
<u>Abgeleitete Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> • Biegespannung bzw. Biegefestigkeit σ bzw. f_m • Biege-Elastizitätsmodul E 	<u>Abgeleitete Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> • Druck- bzw. Zugspannungen σ_d, σ_z sowie Schubspannungen τ_k • Effektive Biegesteifigkeit $(E*J)_{\text{eff}}$ im Bereich von L_s • Theoretische Biegesteifigkeit $(E*J)$ • Effektive Schubsteifigkeit S_{eff} im Bereich L_B

Durch den Einsatz der 4-Punkt-Biegeprüfung können die tatsächlich verursachten Biegespannungen während einer Biegebelastung innerhalb eines inhomogenen Werkstoffes ermittelt werden. Jedoch ist es nicht möglich diese abgeleiteten Werte mit denen durch eine 3-Punkt-Biegung erzielten Spannungen zu vergleichen. Da beide Biegeprüfungen an zwei unterschiedlichen statischen Systemen (3-Punkt- und 4-Punkt-Biegung) durchgeführt werden, entstehen während der Biegung unterschiedliche Spannungsverteilungen in den Prüfkörpern, wodurch die ermittelten Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar oder übertragbar sind. Neben der Evaluierung der Platten durch die abgeleiteten Biegespannungen können die Verbundplatten auch mit Hilfe der Parameter maximale Bruchkraft F_{\max} und Verformung ω bewertet werden. Mit Hilfe der Bruchkraft kann auf das Bruchmoment des Belastungsfalls geschlossen werden. Nach Gleichung 10 und 11 wird das Bruchmoment folgendermaßen berechnet:

Bruchmoment in Nmm nach EN 310:
$$M = \frac{F_{max} * l_1}{4} \quad (10)$$

Bruchmoment in Nmm nach DIN 53 293:
$$M = \frac{F_{max} * l_1}{8} \quad (11)$$

(Herleitung der Gleichungen vgl. Kap. 10.1)

Das bisherige Problem der Vergleichbarkeit von Sandwichplatten durch nicht übertragbare Ergebnisse auf andere Belastungsfälle, sollte durch die Herleitung des Bruchmoments vermeidbar sein. Denn der Bruchmoment einer Platte ist unabhängig von der Belastungsart. Wenn diese Überlegungen zutreffen, dann müsste eine neu entwickelte Sandwichplatte mit einer definierten Dicke nach einem beliebigen Belastungsfall auf Bruch geprüft werden und von der Theorie her mit sämtlichen Werkstoffen mit Hilfe des Bruchmoments vergleichbar sein.

Neben der maximalen Kraft F_{max} wird bei den beiden Prüfungsmethoden (3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfung) die Verformung ω der Verbundplatten aufgezeichnet. An Hand der ermittelten Verformung sollte auch eine qualitative Aussage bezüglich der Platteneigenschaften und deren Gebrauchstauglichkeit möglich sein. Hierzu wird die Verformung bzw. die ermittelte Durchbiegung mit dem Stützweitenabstand in ein Verhältnis gesetzt, um so einen Durchbiegungsfaktor berechnen zu können. Mit Hilfe des berechneten Faktors ist die Evaluierung der Durchbiegung der Sandwichplatten unter Berücksichtigung der Belastung möglich.

3.4 Herstellung der popcornbasierten Sandwichverbundwerkstoffe im Labormaßstab

Das folgende Kapitel stellt die Verfahrensweise zur Herstellung der Popcornverbunde sowie die anschließende Fertigung der Sandwichverbundplatten dar. Des Weiteren wird eine Aufstellung der hergestellten Varianten dargestellt.

3.4.1 Herstellung der Popcornverbundplatten

Nach der chemischen Analyse der Ausgangsmaterialien Mikrowellen-Popcorn bzw. Bichsel-Popcorn und Holz erfolgt in einem nächsten Schritt die Herstellung und anschließende Evaluierung der Popcornverbundplatten. Hierzu wird expandiertes Popcorngranulat in Anlehnung an die industrielle Spanplattenproduktion mit einer Bindemittelflotte, bestehend aus Harnstoffformaldehyd-Harz (UF-Harz) und dem Härtungsbeschleuniger Ammoniumsulfat, behandelt. Anschließend wird das beleimte Granulat in einen Streukasten gegeben und mit einer Presseinrichtung zu einem Plattenwerkstoff kalt vorverdichtet, hierbei wird die Kaltklebrigkeit des Bindemittels ausgenutzt. Im Anschluss erfolgt in einer Ein-Etagen-Unterkolbenpresse der Firma

Siempelkamp, D-47803 Krefeld die Aushärtung der vorgeformten Platte. Nach einer 24 stündigen Konditionierung werden die Verbundplatten geschliffen und besäumt.

Zur Optimierung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der popcornbasierten Verbundplatten werden systematische Untersuchungen durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen steht, verschiedene Kennlinien zu entwickeln und die Abhängigkeiten bestimmter Parameter voneinander einzuschätzen, mit dem Ziel einen materialschonenden Werkstoff zu entwickeln. Hierzu werden ausgewählte Parameter näheren Untersuchungen unterzogen, die sich auf Grund der langjährigen Erfahrung in der Holzwerkstoffindustrie als ausschlaggebend gezeigt haben. Bei den Parametern handelt es sich u. a. um variierende Pressparameter, das ausgewählte Bindemittelsystem, den Bindemittelanteil, etc. (vgl. Tab. 11). Um den Einfluss dieser Faktoren auf die Verbundplatten beurteilen zu können, werden die Querkzugfestigkeiten der Verbundplatten getestet und statistisch mit dem Programm OriginPro 8.5 ausgewertet. Neben der Optimierung des Popcornverbundes steht auch die Bestimmung der nachträglichen Formaldehydabgabe im Focus der Untersuchungen. Hierzu werden die Popcornverbunde, sofern die Verbunde ausreichende Querkzugfestigkeiten erreichen, hinsichtlich ihrer Formaldehydemissionen untersucht.

In einer ersten Versuchsreihe (I) werden popcornbasierte Verbundplatten hergestellt, die sich hinsichtlich des verwendeten Popcornmaterials unterscheiden. Für die Herstellung der Verbunde werden Mikrowellen- und Bichsel-Popcorn eingesetzt, zudem wird das Popcornmaterial zur Herstellung der Platten in verschiedene Granulatfraktionen aufgetrennt. Das Granulat wird in die Größenfraktionen: unfraktioniert (ohne Staub- und Grobpartikel), < 4 mm sowie ≥ 4 mm separiert. Die Rohdichten der Platten betragen 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 . Aufgrund von bereits durchgeführten Voruntersuchungen an Mikrowellen-Popcorn werden für diese Untersuchung die Pressparameter mit einer Presstemperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie einem Presszeitfaktor von 12 s/mm gewählt.

Zur Optimierung der Popcornverbundplatten gilt es in einer zweiten Versuchsreihe (II.a) die Pressbedingungen (Presstemperatur $^\circ\text{C}$ sowie Presszeitfaktor s/mm) an das Bichsel-Popcorn anzupassen und festzulegen, nachdem zuvor auf Grund zu geringer Festigkeitseigenschaften das Mikrowellenpopcorn verworfen wurde. Als Kriterium ist hierbei festgelegt einen Verbund (Rohdichte 200 kg/m^3) mit ausreichender Festigkeit zu erzielen, hierzu werden die Querkzugfestigkeiten der Popcornverbunde bestimmt. Innerhalb dieses Versuches werden Temperaturen von $140 \text{ }^\circ\text{C}$, $160 \text{ }^\circ\text{C}$, $180 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie $200 \text{ }^\circ\text{C}$ und Presszeitfaktoren von $7,5 \text{ s/mm}$, $9,0 \text{ s/mm}$, $10,5 \text{ s/mm}$ sowie $12,0 \text{ s/mm}$ näher betrachtet (vgl. Tab. 11 und 12).

Tabelle 11: Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen zur Optimierung der Popcornverbundplatten

Abhängigkeiten	Untersuchte Parameter
I. Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit vom Ausgangsmaterial	a. Kernlagen aus Mikrowellen- bzw. Bichsel-Popcorn
II. Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Presstemperatur sowie vom Presszeitfaktor	a. Temperaturspanne: 140 °C bis 200 °C Presszeitfaktor: 7,5 s/mm bis 12,0 s/mm b. Temperatur: 180 °C Presszeitfaktor: 4,5 s/mm bis 10,5 s/mm
III. Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte	a. Untersucher Rohdichtebereich: 100 kg/m ³ bis 300 kg/m ³
IV. Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit vom Bindemittelsystem und Beleimungsgrad	a. Beleimung mit Harnstoffformaldehyd-Harz (UF) Beleimungsgrad: 4 % UF-Harz 6 % UF-Harz 8 % UF-Harz
	b. Beleimung mit Methandiisocyanat (MDI) Beleimt mit: 4 % MDI+ 4 % Lösungsmittel 4 % MDI + 4 % Wasser 4 % MDI + 2 % UF-Harz 4 % MDI + 4 % UF-Harz

In einer nachfolgenden Versuchsreihe (II.b) soll geprüft werden, innerhalb welcher Zeitspanne das Bindemittel aushärtet und wie die Presszeit reduziert werden kann, ohne die Festigkeit des Verbundes nachhaltig zu beeinträchtigen. Für die Herstellung der Verbundplatten wird innerhalb dieses Versuches, neben dem UF-Harz K 350 der ebenfalls formaldehydhaltige Kaurit Harz 340 eingesetzt. Die Rohdichte der Verbundplatten beträgt, wie bereits in der Voruntersuchung, 200 kg/m³ (vgl. Tab. 12). Hintergrund dieser Untersuchung ist die Optimierung des Herstellungsprozesses, wobei die genaue Kenntnis über das Verhalten des eingesetzten Bindemittels für einen möglichen industriellen Herstellungsprozess von hoher Bedeutung ist. Für eine industrielle Anwendung ist eine kurze Presszeit verbunden mit ausreichend hohen Festigkeiten des Verbundwerkstoffes von Vorteil.

Im Anschluss an die Erarbeitung und Evaluierung geeigneter Herstellungsparameter (Versuchsreihe I und II) werden weitere Versuchsreihen zur Ermittlung von Kennlinien erstellt.

Tabelle 12: Untersuchung des Einflusses der Pressparameter auf die Querkzugfestigkeit von UF-Harz (K 350 bzw. K 340) gebundenen Popcornverbundplatten

Parameter	Popcornverbund	
	Versuchsreihe II.a	Versuchsreihe II.b
Bindemittel	8 % UF-Harz Kaurit® 350; BASF Ludwigshafen	8 % UF-Harz Kaurit® 350 bzw. 340; BASF Ludwigshafen
Presstemperatur in °C	140 160 180 200	180
Presszeitfaktor in s/mm	7,5 9,0 10,5 12,0	4,5 5,0 5,5 6,0 7,5 9,0 10,5
Rohdichte in kg/m ³	200	200
Dicke in mm	20	20

Hierzu wird die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit der Popcornverbundplatten von verschiedenen Parametern wie z. B. Rohdichte, Beileimungssystem etc. (vgl. Tab. 11) bestimmt. Die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte der Verbundplatten wird in einer nächsten Versuchsreihe (III) näher betrachtet. Es wird untersucht inwieweit sich unterschiedliche Rohdichten der Verbundplatten auf die Querkzugfestigkeiten bei ansonsten gleichbleibenden Herstellungsparametern auswirken. Hierzu werden Popcornverbundplatten mit einer Rohdichtespanne von 100 kg/m³ bis ca. 300 kg/m³ erstellt und hinsichtlich der Querkzugfestigkeit geprüft.

Anschließend wird in einer Versuchsreihe (IV) der Einfluss verschiedener Bindemittelsysteme mit unterschiedlichen Beileimungsanteilen auf die Querkzugfestigkeit der Verbundplatten getestet. Hierzu wird auf die aminoplasthaltigen Kaurit Harze 350 bzw. 340 zurückgegriffen. Die UF-Harz gebundenen Verbundplatten werden in den Rohdichten 200 kg/m³ bzw. 300 kg/m³ mit Beileimungsanteilen von 4 %, 6 % und 8 % hergestellt. Neben UF-Harz wird in den Untersuchungen auch der Einfluss eines auf MDI basierten Bindemittels mit einem Beileimungsgrad von 4 % auf die Verbundplatten ermittelt. Hierzu wird MDI mit Wasser bzw. Lösungsmittel bzw. mit UF-Harz emulgiert und als Bindemittel verwendet (vgl. Tab. 11).

3.4.2 Herstellung und Untersuchung popcornbasierter Sandwichverbundplatten

Im Anschluss an die Optimierungsphase der Popcornverbundplatten erfolgt die Entwicklung und Herstellung der Sandwichverbundplatten mit anschließender Evaluierung der mechanisch-technologischen Eigenschaften. Hierzu werden zwei unterschiedliche Herstellungsverfahren herangezogen. Zum einen wird ein einschrittiges Herstellungsverfahren und zum anderen ein zweischrittiges Verfahren geprüft. Bei dem Einschritt-Verfahren soll untersucht werden, ob neben der Herstellung einer materialschonenden Sandwichplatte auch eine kontinuierliche Herstellung in Anlehnung an die Spanplattenproduktion möglich ist. Hierzu werden innerhalb des Labormaßstabes für die Mittellage Popcorngranulat und für die Formung der Deckschichten Industrieholzspäne bzw. Holzfasern verwendet. Die Materialien werden in einer Belemungseinheit mit einem Bindemittelsystem, bestehend aus UF-Harz und Härter, behandelt und anschließend in einen Streukasten zur Ausformung der Sandwichplatte gestreut (vgl. Tab. 13).

Tabelle 13: Übersicht der verwendeten Belemungs- sowie Pressparameter zur Herstellung der Sandwichplatten im Einschritt-Verfahren

Komponente	Parameter	Sandwichplatte
Bindemittel	Typ, Hersteller	UF-Harz Kaurit® 350, BASF Ludwigshafen
	Feststoffgehalt (%)	68
	Menge auf atro Popcorn (%)	8,0
	Menge auf atro Span (%)	12,0
	Menge auf atro Fasern (%)	12,0
Härtungsbeschleuniger	Typ	Ammoniumsulfatfösung
	Konzentration (%)	40
	Menge auf atro Festharz (%)	1,0
Presstemperatur	°C	180
Pressfaktor	s/mm	10,5

Innerhalb dieses Verfahrens ist der erste Schritt die Streuung einer Deckschicht aus den beleimten Holzspänen bzw. Holzfasern. Auf diese Schicht wird eine Mittellage aus Popcorngranulat gegeben und anschließend erfolgt eine weitere Streuung der Deckschicht aus dem zuvor verwendeten Material. Nach der Streuung einer Schicht (Deckschicht bzw. Mittellage) wird das Material leicht vorverdichtet, um so eine deutliche und voneinander abgesetzte Ausbildung der einzelnen Schichten zu garantieren. Der „Kuchen“ der Sandwichplatte wird nach der Streuung noch einmal mit einer Presseinheit komprimiert, um so Rohdichteschwankungen innerhalb der Platten zu minimieren. In einem letzten Schritt erfolgt das Heißpressen der Sandwichplatten mit anschließendem Konditionieren und Besäumen (vgl. Abb. 9).

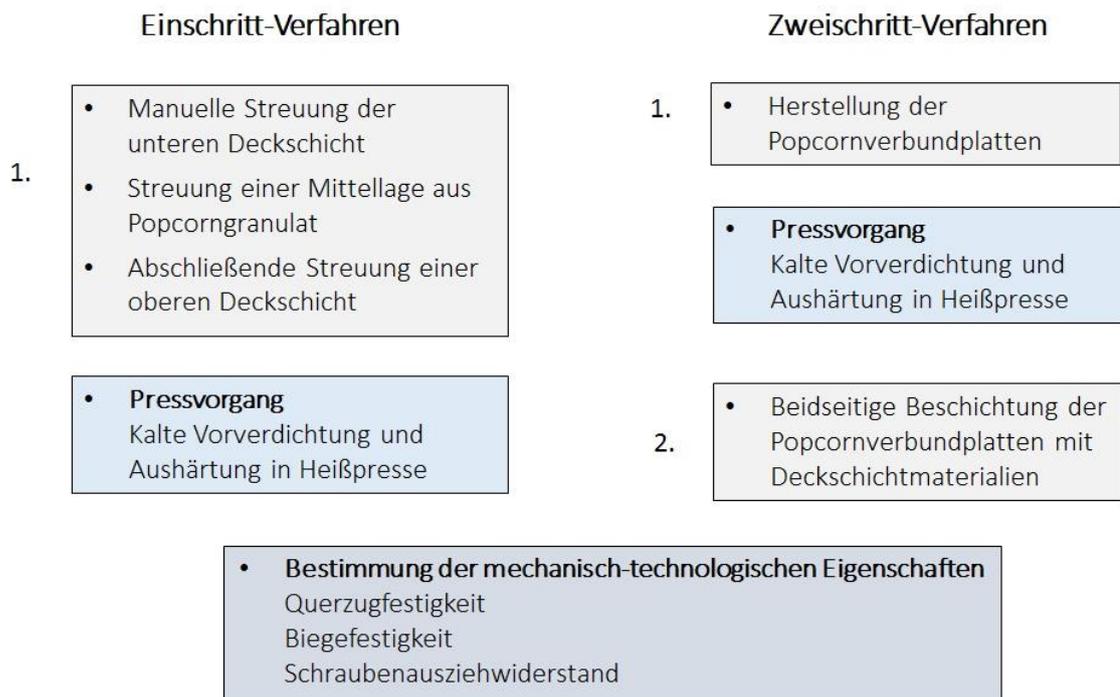


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Herstellungsverfahren zur Fertigung und Evaluierung der Sandwichplatten.

Innerhalb des Einschritt-Verfahrens werden drei unterschiedliche Versuchsreihen (V bis VII) durchgeführt (vgl. Tab. 14). In Versuchsreihe V kommen Industrieholzspäne sowie Holzfasern zum Einsatz, um die Deckschichten der Sandwichplatten zu formen. Die gewichtsbezogenen Anteile der Deckschichten an den Gesamtplatten betragen 40 % und die Platten weisen Gesamtrohdichten von etwa 300 kg/m³, 400 kg/m³ sowie 450 kg/m³ auf. In dieser Versuchsreihe soll geprüft werden, ob sich beide Materialien zum Ausformen von Deckschichten für Sandwichplatten eignen. Nach der Evaluierung der Platteneigenschaften wird das Spanmaterial zur Herstellung der Sandwichplatten als ungeeignet angesehen und für weitere Versuche nicht weiter herangezogen. In der Versuchsreihe VI wird ausschließlich auf Fasermaterial zur Ausbildung der Deckschichten zurückgegriffen. Hier werden die Platten in den Rohdichten 300 kg/m³ sowie 400 kg/m³ und in Dicken von 20 mm bzw. 30 mm gefertigt. Für die Fertigung der Sandwichplatten werden die Materialien mit unterschiedlichen Bindemitteln behandelt. So wird in einer Variante das Popcorn- bzw. Fasermaterial mit K 350 bzw. K 340 beleimt (Variante VI.a). In einer weiteren Variante kommen zwei verschiedene Bindemittel für die Sandwichplattenherstellung zum Einsatz, für die Beleimung des Popcorns werden K 350 bzw. K 340 und für die Fasern wird PMDI verwendet (Variante VI.b). Die Versuchsreihe VII zeigt die Wirkung unterschiedlich stark ausgeformter Deckschichten. Hierzu werden die Deckschichtanteile aus Fasermaterial zwischen 40 %, 50 % sowie 60 % an der Gesamtplatte variiert und anschließend werden die Biegeeigenschaften der Sandwichplatten mittels 3-Punkt-

Biegeprüfung bestimmt (Versuchsreihe VII.a). Zusätzlich werden die nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung ermittelten Bruchmomente gegenübergestellt und deren Unterschiede herausgearbeitet (Versuchsreihe VII.b). Die Rohdichten der Sandwichplatten betragen 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3 und die Platten besitzen eine Dicke von 20 mm.

Tabelle 14: Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen zur Beurteilung der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten

Versuchsreihe	Plattenvariante	Rohdichte in kg/m^3	Dicke in mm	Beleimungssystem
V	Sandwichplatten mit Deckschichten aus Holzspänen bzw. Holzfasern	300 400 450	20	Popcornverbund: 8 % K 350 Deckschicht: 10 % K 350
VI	Sandwichplatten mit Deckschichten aus Fasermaterial, hergestellt mit unterschiedlichen Beleimungssystemen	300 400	20 30	a) Popcornverbund: 8 % K 340 bzw. K 350 Deckschicht: 10 % K 340 bzw. K 350 b) Popcornverbund: 8 % K 340 bzw. K 350 Deckschicht: 4 % PMDI
VII	Sandwichplatten mit unterschiedlich stark ausgebildeten Deckschichten aus Fasermaterial	300 400	20	Popcornverbund: 8 % K 350 Deckschicht: 10 K 350

Bei dem sogenannten Zweischritt-Verfahren werden die optimierten Verbundplatten (vgl. Kap. 5.4.1, Versuchsreihe III) herangezogen und beidseitig mit Deckschichtmaterialien beschichtet. Innerhalb dieses Prozesses werden die beiden Versuchsreihen VIII sowie IX durchgeführt. In der Versuchsreihe VIII.a werden Popcornverbunde in den Rohdichten 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 mit Plattendicken von 20 mm mit unterschiedlichen Beschichtungsmaterialien beplankt. Für den Zweck der Beschichtung kommen dünne sowie steife Materialien wie bspw. HPL (High Pressure Laminate), Aluminium bzw. Buchen- oder Pappel-Sperrholz zum Einsatz (vgl. Tab. 15). Bei der Herstellung des Sandwichverbundes ist die Realisierung einer schubfesten Verbindung der Materialien von hoher Bedeutung, daher wird zur Verklebung der HPL- bzw. Sperrholzsichten mit dem Popcornverbund ein handelsüblicher PVAc-Leim der Firma Henkel AG & Co., D-40589 Düsseldorf verwendet. Für die Beplankung mit den Aluminiumdeckschichten wird auf einen Epoxid-Harz der Firma Carl Roth GmbH + Co. KG, D-76185 Karlsruhe zurückgegriffen, um so eine feste Verbindung zu gewährleisten. In Versuchsreihe VIII.b werden die Deckschichten mit denen die höchsten Bruchmomente innerhalb der Versuchsreihe VIII.a erzielt werden konnten wiederholt zur Sandwichplattenherstellung verwendet, um anschließend deren Biegeeigenschaften mittels 3-Punkt- sowie 4-Punkt-Biegeprüfung zu bestimmen.

Der Einfluss der Plattendicke auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Sandwichplatten wird in der Versuchsreihe IX getestet. Hierzu werden Popcornverbunde in den Plattendicken 10 mm, 20 mm sowie 25 mm hergestellt und mit HPL der Dicke 0,5 mm beplankt. Zusätzlich werden anhand dieser Versuchsreihe und den ermittelten Ergebnissen die Unterschiede zwischen der 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfung herausgearbeitet.

Tabelle 15: Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen zur Beurteilung der im Zweischritt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten

Versuchsreihe	Sandwichplatte		
	Popcornverbund		Beschichtung
	Rohdichte in kg/m ³	Dicke in mm	
VIII	200 300	20	HPL (High Pressure Laminate) (0,5 mm) Aluminium (0,5 mm sowie 0,8 mm) Buchen-Sperrholz (3,0 mm) Pappel-Sperrholz (3,0 mm) Dünn-MDF (3,0 mm) Dünn-Spannplatte (3,0 mm)
IX	200	10 20 25	HPL (0,5 mm)

Die hergestellten Sandwichplatten werden alle im Zuge der Werkstoffprüfung hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften wie bspw. Biegefestigkeit und Schraubenausziehwiiderstand untersucht (vgl. Tab. 16). Hierzu werden die Sandwichplatten entsprechend den Normanforderungen zurechtgeschnitten und für die Prüfungen präpariert.

Tabelle 16: Übersicht der durchgeführten Prüfungen an den Sandwichplatten

Prüfung	Norm
Rohdichte	DIN EN 323
3-Punkt-Biegeversuch	DIN EN 310
4-Punkt-Biegeversuch	DIN 53 293
Schraubenausziehwiiderstand	DIN EN 320

3.5 Herstellung von leichten Sandwichverbundplatten im Industriemaßstab

Im Zuge des Projektes werden nach einer erfolgreichen Entwicklung und Optimierung von Rezepturen zur Herstellung von popcornbasierten Sandwichverbundplatten im Labormaßstab, diese Rezepturen auf den industriellen Maßstab angewendet. Hierzu wird ein Industrieversuch im Technologie Center der Fa. Sandvik Process System in D-70736 Fellbach/ Schmieden

durchgeführt. Mit Hilfe dieses Versuches soll geprüft werden, in wieweit eine industrielle, kontinuierliche Herstellung von homogenen Sandwichverbundplatten mittels einer Doppelbandpressenanlage möglich ist.

3.5.1 Herstellung der Sandwichverbundplatten

Die Herstellung der popcornbasierten Verbundplatten bzw. Sandwichverbundplatten erfolgt in Anlehnung an die entwickelten Rezepturen im Labormaßstab (vgl. Kap. 3.4.1, Tab. 11). Dementsprechend wird das Popcorngranulat mit einer Bindemittelflotte, bestehend aus Harnstoffformaldehyd-Harz (Kaurit 350) und Ammoniumsulfatlösung, behandelt. Anschließend findet eine manuelle Streuung des Materials zu einem „Kuchen“ zur Herstellung der Verbundplatten mit Zielrohdichten von ca. 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 und einer Zieldicke von 20 mm statt. Der „Kuchen“ wird mittels einer Presseinheit auf ca. 25 mm vorverdichtet, um so ein reibungsloses Einfahren in die Doppelbandpresse zu gewährleisten. Die so vorverdichteten Verbundplatten werden mit zwei lose aufgelegten Deckschichten aus HPL bzw. Dünn-MDF versehen. Um eine ausreichend feste Verbindung zwischen Deckschicht und Popcornverbund zu realisieren, werden die Deckschichten zuvor mit MDI (Methyldiphenylisocyanat, 200 g/cm^2) behandelt. Im Anschluss an diesen Verfahrensschritt werden die Platten auf ein teflonbeschichtetes Förderband der Presse gegeben und innerhalb der Doppelbandpresse abschließend unter Aushärtung des Bindemittels restverdichtet.

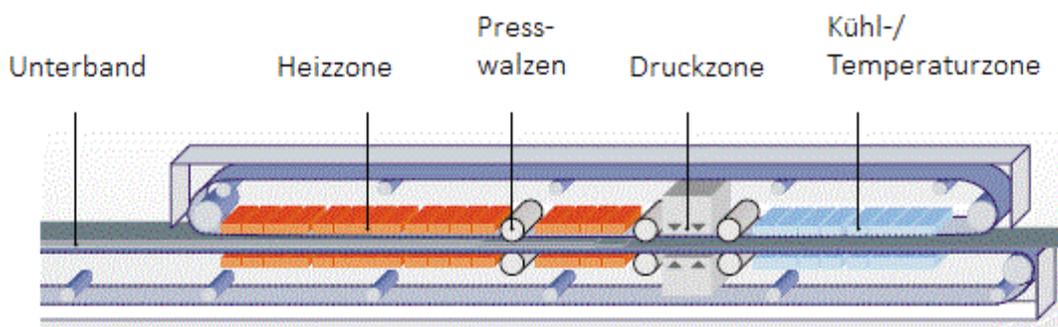


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Sandvik Doppelbandpresseneinheit mit Heiz-, Aushärtungs- sowie Kühlzone (Sandvik, 2016).

Die verwendete Presse ist mit einer Heizzone und einem Presswalzensystem, durch das ein konstanter Liniendruck auf das zu verdichtende Material gewährleistet werden kann, ausgestattet (vgl. Abb. 10). Für den Versuch wird die Presse mit einer Durchlaufgeschwindigkeit von $0,6 \text{ m/min}$ und 200 °C gefahren, mittels dieser Einstellung kann eine Temperatur von 105 °C innerhalb der Mittellagen der Sandwichverbundplatten realisiert werden. Durch den Einsatz

dieser Doppelbandpresse kann ein ausreichend starker und flächig verteilter Druck auf die Sandwichplatten gegeben werden, sodass die Fertigung einer stabilen Verbundplatte möglich ist.

4 Statistische Auswertung der Ergebnisse

Die hergestellten Sandwichplatten und Popcornverbundplatten werden hinsichtlich der physikalisch-technologischen Eigenschaften untersucht und stets als arithmetisches Mittel mit Standardabweichung in den Diagrammen wiedergegeben. Die Anzahl der Platten ist in den unterschiedlichen Variante nicht einheitlich, so werden in den Untersuchungen hinsichtlich der Popcornverbundplatten sowie der Sandwichverbundplatten hergestellt im Einschnitt-Verfahren in jeder Variante 5 Platten hergestellt ($N=5$ pro Variante). In den Varianten bezüglich der Sandwichplatten hergestellt im Zweischritt-Verfahren beträgt die Anzahl der Platten lediglich 3 ($N=3$ pro Variante). Um zu entscheiden, ob die ermittelten Mittelwertsunterschiede zufällig sind oder ob es sich um tatsächliche Unterschiede handelt, werden verschiedene statistische Tests durchgeführt. Diese Untersuchungen werden mit der Datenanalyse- und Grafiksoftware OriginPro 8.5 G durchgeführt. Der erste Schritt in der Datenanalyse ist die Überprüfung der einzelnen Varianten auf Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro-Wilk Tests bzw. der Varianzhomogenität durch Anwendung des Levene Tests. Wenn die Tests ergeben, dass die Daten normalverteilt sind und eine Varianzhomogenität vorliegt, dann wird eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit anschließendem Tuckey-Test durchgeführt. Hierdurch wird geprüft, ob und wo zwischen den einzelnen Varianten Unterschiede bestehen. Wenn jedoch die mathematischen Voraussetzungen einer ANOVA nicht gegeben sind, dann werden nicht parametrische Tests herangezogen. Bei Ausbleiben der Varianzhomogenität wird unter anderem ein Signifikanztest nach Kruskal-Wallis eingesetzt, dieser bietet eine Alternative zur einfaktoriellen Varianzanalyse. Dieser Test eignet sich für ordinalskalierte Daten von mehr als zwei unabhängigen Gruppen. Mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests kann lediglich geprüft werden, ob sich die Gruppen voneinander unterscheiden. Zur Lokalisierung der Unterschiede muss anschließend ein Steel- bzw. Behrens-Fischer Test durchgeführt werden. Auf die Wahrscheinlichkeit eines signifikanten bzw. nicht signifikanten Unterschiedes wird in der Diskussion der Ergebnisse hingewiesen.

5 Ergebnisse und Diskussion

Innerhalb dieser Arbeit wird untersucht, ob unter Verwendung der nachwachsenden Einjahrespflanze Mais die Herstellung einer leichten dreischichtigen Sandwichplatte – mit für die Holzwerkstoffindustrie akzeptablen Festigkeitseigenschaften – möglich ist. Im folgenden Abschnitt werden die systematisch erhobenen Daten zu den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Popcorngranulate und Verbundplatten bzw. der mechanisch-technologischen Prüfungen dargestellt und erläutert. Hierzu erfolgt zuerst eine Charakterisierung der Ausgangsmaterialien auf chemisch-physikalischer Ebene und anschließend werden die Granulate zur Herstellung von Popcornverbundplatten verwendet. Nach Auswertung der erzielten Eigenschaften wird die geeignetste Verbundplatte zur weiteren Entwicklung einer leichten Sandwichplatte herangezogen.

5.1 Chemisch-physikalische Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien

5.1.1 Schüttdichte und Siebanalyse

Nach BRINKMANN (1982) stellt das Schüttgewicht einen wichtigen Faktor dar, der sich auf die Eigenschaften eines Verbundwerkstoffes stark auswirken kann, so beeinflusst bspw. die Schüttdichte u. a. die Mindestrohndichte eines Werkstoffes. Um einen leichten in sich homogenen Plattenwerkstoff herzustellen, sollte die Schüttdichte des Ausgangsmaterials deutlich unterhalb der anvisierten Plattenrohndichte liegen. Denn bei einer niedrigen Schüttdichte ist eine stärkere Verdichtung der Materialien zum Plattenwerkstoff mit der anvisierten Zielrohndichte möglich. Fällt das Verdichtungsverhältnis während des Pressvorgangs zu gering aus, kann kein in sich stabiler Werkstoff erzielt werden.

In Tabelle 17 sind die ermittelten Schüttdichten der verschiedenen Popcorngranulate und zu Vergleichszwecken die Schüttdichten von Fichtenholzspänen (getrennt nach Deck- und Mittelschicht) aufgeführt. Der Feuchtegehalt bei den untersuchten Materialien liegt zwischen 3,5 % und 5,0 %. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die untersuchten Popcorngranulate Schüttdichten zwischen 46 kg/m^3 und 63 kg/m^3 aufweisen und somit deutlich leichter als Fichtenholzspäne sind. Demzufolge ist das Granulat deutlich besser für die Herstellung von leichten Platten geeignet als die Holzspäne. Des Weiteren ist der Tabelle zu entnehmen, dass innerhalb der unterschiedlichen Mikrowellen-Popcorngranulate im Vergleich zu Bichsel-Popcorngranulaten lediglich geringfügige Unterschiede hinsichtlich der Schüttdichte festzustellen sind.

Tabelle 17: Schüttdichten der unterschiedlichen Popcorngranulate sowie zu Vergleichszwecken von Fichtenspänen

Material	Schüttdichte in kg/m ³
Mikrowellen-Popcorn	
Popcorn mit Feinanteil (0 mm bis 1 mm)	53,3
Popcorn ohne Feinanteil (0 mm bis 1 mm)	51,2
Popcorn ≥ 4 mm	43,1
Popcorn < 4 mm	52,0
Bichsel-Popcorn	
Popcorn mit Feinanteil (0 mm bis 2 mm)	64,1
Popcorn ohne Feinanteil (0 mm bis 2 mm)	59,0
Popcorn ≥ 4 mm	46,3
Popcorn < 4 mm	61,7
Fichtenspanmaterial	
Deckschichtspäne	170,4
Mittelschichtspäne	119,3

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Fraktionen wird deutlich, dass die Schüttdichte deutlich von der Geometrie der Partikel, vom Expansionsgrad des Maiskorns sowie vom Fein- bzw. Grobanteil beeinflusst wird. Diese Beobachtung bezüglich der Geometrie entspricht auch der Aussage von KOLLMANN (1966). Es zeigt sich, dass das Bichsel-Popcorn (mit Feinanteil) eine Schüttdichte von ca. 64 kg/m³ und somit eine 21 % höhere Schüttdichte aufweist als das Mikrowellen-Popcorn (mit Feinanteil) mit lediglich 53 kg/m³. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass beim Bichsel-Popcorn ein deutlich höherer Anteil an nicht aufgepufften Maispartikeln vorhanden ist. Nach Entfernung des Feinanteils bei beiden Popcornvarianten verringert sich der Dichteunterschied auf 15 %, wobei die Schüttdichte des Bichsel-Popcorns weiterhin über der des Mikrowellen-Popcorns liegt. Die gleichmäßig geformten Partikel des Bichsel-Popcorns liegen enger aneinander und führen somit zu einer höheren Schüttdichte. Die höhere Schüttdichte wird demnach zu einem niedrigeren Verdichtungsverhältnisses des Werkstoffes führen und kann sich negativ auf die Platteneigenschaften insbesondere auf die Biegefestigkeit bzw. Zugfestigkeit auswirken (WKI, 2008). Bei der Plattenherstellung ist auf eine Mindesthöhe des vorgeformten „Popcornkuchens“ zu achten, da ansonsten die Partikel nicht stark genug komprimiert werden und die Verbindung zwischen den Partikeln nicht ausreicht. Ein herabgesetztes Verdichtungsverhältnis bei der Plattenausformung hat einen geringen Pressdruck auf das Material zur Folge und wird sich in einem weniger stark ausgeprägten Rohdichteprofil äußern und

kann darüber hinaus die Biege- bzw. Querkzugfestigkeiten negativ beeinflussen (LIIRI, 1960; VOLTZ, 1974). Durch eine Fraktionierung der Granulate kann die Schüttdichte für beide Popcornvarianten herabgesetzt werden, jedoch ist hier zu beachten, dass so ein hoher Anteil des Materials ungenutzt bleibt.

Neben der Schüttdichte wird auch die Größenverteilung der einzelnen Materialien untersucht. Hierzu werden Mikrowellen- bzw. Bichsel-Popcorn sowie zu Vergleichszwecken Fichtenholzspäne in einzelne Fraktionen aufgetrennt und verglichen. Die Siebanalyse bezieht sich auf die unterschiedlichen Fraktionierungen, die zu Beginn des Kapitels erläutert wurden. In Abbildung 11 ist die Verteilung der Partikelgrößen des Mikrowellen- sowie des Bichsel-Popcorns vergleichend dargestellt. Es zeigt sich, dass mehr als 73 % des Bichsel-Popcorns auf die Fraktionen ≥ 4 mm bis 10 mm entfallen und dass hierbei mit einem Maximum von ca. 53 % die Fraktion 4,0 mm bis 6,3 mm den größten Anteil einnimmt. Dagegen entfallen auf die Fraktionen 6,3 mm bis 8,0 mm bzw. 8,0 mm bis 10,0 mm lediglich 14 % bzw. 5 % des Popcorns. Lediglich 26 % des Popcorns finden sich in den kleineren Fraktionsgrößen von 2,0 mm bis 4,0 mm wieder. Im Vergleich hierzu findet sich bei der Größenverteilung des Mikrowellen-Popcorns in den Fraktionen 4,0 mm bis 10,0 mm mit etwa 62 % ca. 10 % weniger als beim Bichsel-Popcorn in den entsprechenden Fraktionsgrößen.

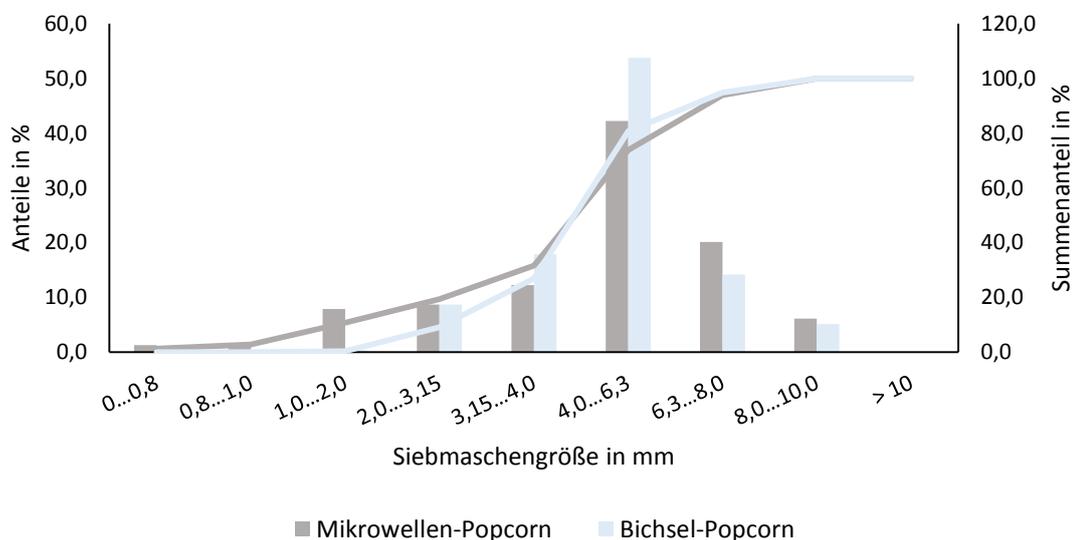


Abbildung 11: Fraktionsgrößenverteilung des Bichsel- sowie Mikrowellen-Popcorns (gesiebt und ohne Feinanteil).

Bei dem beschriebenen Popcorn handelt es sich um zuvor gesiebtes Material. Durch den Siebprozess konnten beim Mikrowellen- bzw. Bichsel-Popcorn Feinanteile von ca. 20 % bzw. 9 % entfernt werden. Der hohe Feinanteil führt beim ungesiebten Mikrowellen-Popcorn zu einer erhöhten Schüttdichte (mit ca. 53 kg/m³). Bei dem Feinanteil handelt es sich im Falle des

Mikrowellen-Popcorns hauptsächlich um die Maishäute und feinen Staub, der sich von den Popcorngranulaten gelöst hat. Dagegen besteht der Feinanteil beim Bichsel-Popcorn im Wesentlichen aus nicht aufgepufften Maisschrot. Diese Schrotpartikel bewirkt eine Erhöhung der Schüttdichte um ca. 8 % auf 64 kg/m^3 (vgl. Tab. 17).

Zu Vergleichszwecken werden ebenfalls die Schüttdichte sowie die Größenverteilung von Fichtenholzspänen (Deckschicht sowie Mittelschichtspäne) untersucht (vgl. Abb. 12). Im Falle der Deckschicht- bzw. Mittelschichtspäne betragen die Schüttdichten ca. 170 kg/m^3 bzw. 119 kg/m^3 , wobei das Schüttgewicht der Mittelschichtspäne um ca. 30 % niedriger ausfällt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Holzmaterial eine deutlich höhere Schüttdichte aufweist als die beiden Popcornmaterialien. Die niedrige Schüttdichte des Popcorns ergibt sich aus der Popcornstruktur. Nach der Expandierung der Maiskörner bzw. der Maispartikel weist Popcorn viele luftgefüllte Poren auf, die wiederum zu einer erheblichen Schüttdichtereduzierung beitragen. Des Weiteren sind die einzelnen Popcornpartikel deutlich voluminöser und besitzen nicht die schlanke Struktur der Holzspäne, d. h., dass mit der Ausformung der Partikel ein erheblicher Einfluss auf die Schüttdichte genommen werden kann. Neben der deutlich geringeren Schüttdichte des Popcorns gegenüber der Fichtenspäne, zeigen sich auch Unterschiede in der Größenverteilung zwischen den Materialien. In Bezug auf die Mittelschichtspäne zeigt sich, dass zwei Maxima in den Fraktionen 1,25 mm bis 2,0 mm bzw. 2,0 mm bis 3,15 mm mit jeweils ca. 30 % ausgeformt sind. Mit Blick auf die Deckschichtspäne ist eine annähernde Normalverteilung mit einem Kulminationspunkt in der Fraktion 0,4 mm bis 0,6 mm mit ca. 24 % zu erkennen. Die Untersuchung zeigt, dass es generelle Unterschiede zwischen den Materialien sowie der Größenverteilung der Partikel gibt. Bei beiden Materialien gibt es im Herstellungsprozess Faktoren, die großen Einfluss auf diese ausüben. So ist bspw. beim Bichsel-Popcorn der Umwandlungsprozess vom Maispartikel zum Popcorn ausschlaggebend. Die Holzspäne werden dagegen im Herstellungsprozess beim Hacken und Zerspanen geformt. Neben diesen genannten Faktoren spielen aber noch zahlreiche andere Aspekte in der Ausformung der Materialien eine wichtige Rolle, wie z. B. Materialfeuchte, Holzrohndichte, Dauer der Bearbeitung, Maisschrotgröße, etc..

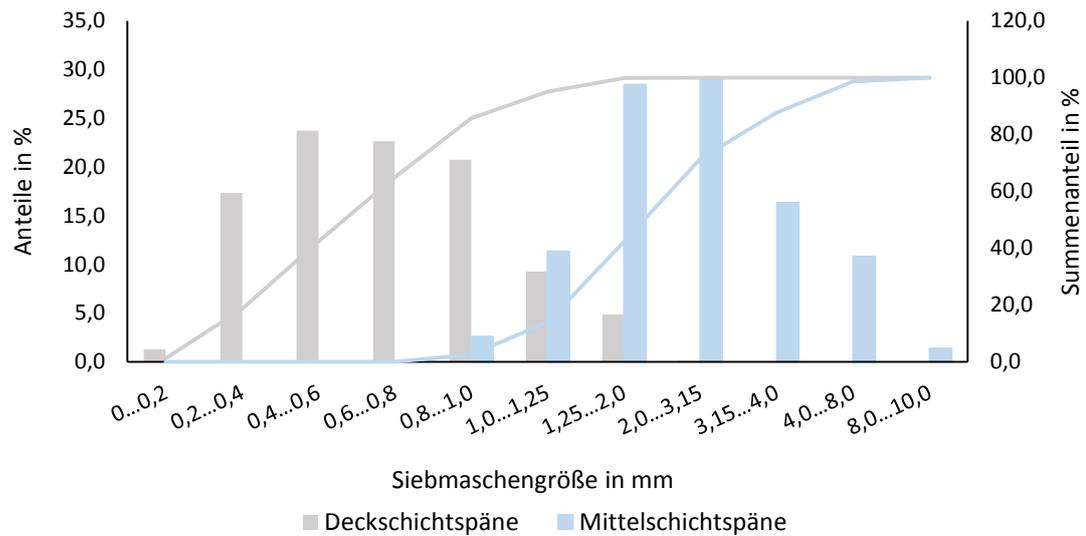


Abbildung 12: Fraktionsgrößenverteilung der Deck- bzw. Mittelschichtspäne (Fichte).

5.1.2 Bestimmung des pH-Wertes und der Pufferkapazität

Die Bestimmung der chemischen Eigenschaften der Materialien ist für die Herstellung von Werkstoffen von Bedeutung, da hierdurch u. a. die Beileimung beeinflusst werden kann (SANDERMANN und ROTHKAMM, 1959). Somit werden mit Hilfe einer Extraktion (Kaltwasser) pH-Werte und Pufferkapazitäten des Popcornmaterials bzw. der Holzspäne analysiert (vgl. Kap. 3.2.2), da hierdurch die für die Beileimung wichtigen Aciditätseigenschaften der Materialien erfasst werden können (ROFFAEL und RAUCH, 1974; JUNG und ROFFAEL, 2002). Der pH-Wert und die Pufferkapazität sind relevante Größen, da sie den Verlauf der Aushärtung einiger Klebstoffsysteme bestimmen und beeinflussen (SELLERS et al., 1988; RADOVIC, 2005). Aus der Untersuchung geht zum einen hervor, dass sich das Bichsel-Popcorn nur unwesentlich vom Mikrowellen-Popcorn hinsichtlich der aciden Eigenschaften unterscheidet. Die pH-Werte der kaltwässrigen Auszüge für das Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn liegen bei 5,2 bzw. 5,5. Des Weiteren hat die Untersuchung gezeigt, dass zwischen den Popcornmaterialien und den zum Vergleich herangezogenen Fichtenholzspänen keine relevanten Unterschiede bestehen (vgl. Tab. 18). Der pH-Wert für die Fichtenspäne fällt, verglichen mit Angaben aus der Literatur mit Werten zwischen 4,5 und 4,9, mit 5,1 etwas hoch aus (ROFFAEL et al., 1992). Diese Abweichung kann mit der Spanzusammensetzung zusammenhängen, so konnten KARRER (1958) und POPPER (1974) Variationen in den Holzinhaltsstoffen vom Ast bis zum Stamm ausfindig machen und BUCHHOLZER (1990) weist darauf hin, dass sich der Standort eines Baumes auf die pH-Werte des Holzes niederschlagen kann. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die wässrigen Lösungen des Holzes geringfügig acider ausfallen als die des Popcornmaterials.

Die Prüfung der Pufferkapazität zeigt zwischen den Popcornmaterialien ebenfalls kaum Unterschiede. So liegen die Pufferkapazitäten des Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorns bei ca. 2,6 mmol bzw. 2,8 mmol NaOH/100 g atro Popcornmaterial. Dagegen kann im Filtrat der Fichtenspäne mit ca. 0,6 mmol NaOH/100 g atro Fichtenspanmaterial eine deutlich niedrigere Pufferkapazität nachgewiesen werden (vgl. Tab. 18).

Tabelle 18: pH-Wert sowie Pufferkapazität nach der Kaltwasserextraktion der Materialien Popcorn sowie Fichtenspäne

Material	Kaltwasserextraktion	
	pH-Wert	Pufferkapazität in mmol NaOH/ 100 g Material
Mikrowellen-Popcorn	5,51	2,64
Bichsel-Popcorn	5,23	2,83
Fichtenspanmaterial	5,11	0,62

5.1.3 Bestimmung des Proteingehaltes bzw. Stickstoffgehaltes nach Kjeldahl

Mit Hilfe der Kjeldahl-Methode (vgl. 3.2.3) ist es möglich den Proteingehalt im Probenmaterial über den Stickstoffgehalt rechnerisch zu bestimmen (OWUSU-APENTEN, 2002).

Anhand der ermittelten Ergebnisse wird deutlich, dass es zwischen den Popcornsorten – Bichsel-Popcorn und Mikrowellen-Popcorn – hinsichtlich des Proteingehaltes bzw. Stickstoffgehaltes kaum einen Unterschied auszumachen gibt (vgl. Tab. 19). Die Verfahrensweise wie das Material expandiert wird, also nach dem Bichsel-Verfahren (hoher Druck und Heißdampf) bzw. mit Hilfe von Mikrowellentechnologie, scheint keinen Einfluss auf den Proteingehalt zu haben.

Tabelle 19: Protein- und Stickstoffgehalt von Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn sowie von Maiskörnern und Fichtenholzspänen nach der Kjeldahl-Methode

Probenmaterial	Mittlerer Stickstoffgehalt in %	Mittlerer Proteingehalt in %
Mikrowellen-Popcorn	1,73	10,81
Bichsel-Popcorn	1,31	8,19
Maiskörner (Event Depot Puffmais)	1,65	10,31
Kraftfuttermais Handel	1,91	11,94
Fichtenholzspäne*	< 0,11	0,69

*(SCHMIDT, 1994)

Ferner kann auch kein signifikanter Unterschied zwischen dem Proteingehalt von Mais und Popcorn erkannt werden. Daraus ist zu schließen, dass durch die Umwandlungsphase die Proteinstrukturen nicht betroffen und verändert werden. In der Literatur wird der Proteingehalt von Maiskörnern mit ca. 9 % bis 13 % angegeben (CORTEZ UND WILD-ALTAMIRANO, 1972; KLINGLER, 1995; RITTER, 2012). Diese Werte können jedoch zwischen den unterschiedlichen Maissorten

variieren. Mit der Untersuchung von zwei verschiedenen Maissorten, zum einen die Maiskörner für die Herstellung von Popcorn in der Mikrowelle und zum anderen Kraftfutter Mais für die Veredelung von Vieh, können diese Angaben bestätigt werden (vgl. Tab. 19). Aus der Analyse geht hervor, dass Futtermais einen leicht höheren Proteingehalt aufweist als der Puffmais. Die Variabilität des Proteingehaltes wird zum einen durch den genetischen Faktor und zum anderen durch den Standort signifikant beeinflusst (FAO, 1992). Im Vergleich zu Fichtenholzspänen enthält Popcorn einen wesentlich höheren Anteil an Stickstoff, der sich auf mögliche Abbauvorgänge am Ende der Gebrauchsphase positiv auswirken kann. HUNGATE (1940), KOLLMANN (1951 und GARRETT (1970) weisen in ihren Arbeiten darauf hin, dass organische Materialien mit einem hohen Stickstoffanteil schneller durch Pilze oder andere Organismen abgebaut werden. Dies liegt vorrangig daran, dass Stickstoff ein essentieller Bestandteil für das Wachstum der Organismen darstellt (COWLING und MERRILL, 1966; BLANCHETTE und BIGGS, 1992). Somit könnte der Stickstoffgehalt dazu beitragen das Produkt Popcornverbundplatte bzw. Sandwichplatte nach der Gebrauchsphase als Plattenwerkstoff in ein neues Produkt zu überführen. Hier käme bspw. Kompost bzw. Substrat als Anwendung in Frage. Ferner wird dem Popcorn auf Grund des relativ hohen Gehalts an Proteinen eine Rolle als Formaldehydfänger nachgesagt. Hierbei wird suggeriert, dass es zu einer Vernetzung zwischen den Aminogruppen der Proteine mit den Formaldehydmolekülen und somit schließlich zur Bindung des Formaldehyds kommt (MCGREGOR et al., 2006) (vgl. Kap. 3.2.4 und 5.1.4).

5.1.4 Bestimmung des Formaldehydabsorptionsvermögens

In jüngster Zeit wird die Verbesserung der Innenluft hygiene intensiv diskutiert. Zielsetzung hierbei ist es Emissionen aus Werkstoffen zu benennen und hohe Konzentrationen zu vermeiden. Daher wird auf Emissionen aus den entwickelten Werkstoffen und den Einsatz möglicher Formaldehydfänger besonderes Augenmerk gelegt. Ansätze zur Reduktion der Formaldehydemissionen aus Werkstoffen gibt es zahlreiche, hierzu zählen u. a. Formaldehydfänger (Proteine, Rinden, Tannine), Beplankung von Werkstoffen sowie der Einsatz formaldehydarmer bzw. -freier Bindemittel (DIX und MARUTZKY, 1984; DUNKY, 2002; DIX und BÖRNER, 2013; RITTER, 2012; LINK, 2014). Eine Methode, die Rückschlüsse auf die Eignung von Materialien als Formaldehydfänger in Werkstoffen erlaubt, ist es das Formaldehydabsorptionsvermögen der verwendeten Ausgangsstoffe zu untersuchen. Hierzu wird Bichsel-Popcorn bei unterschiedlichen Temperaturen Formaldehyd ausgesetzt, um zu prüfen, ob das Popcorngranulat in der Lage ist Formaldehyd zu binden und somit als Fänger zu wirken (vgl. 3.2.4). In der Abbildung 13 ist die Formaldehydaufnahme von Bichsel-Popcorn nach 1 h, 2 h sowie nach 3 h bei einer Temperaturspanne von 20 °C, 30 °C, 50 °C, 70 °C sowie 103 °C

dargestellt. Die Untersuchungen machen deutlich, dass Popcorn – unabhängig von der Umwandlungstechnik – mit steigender Temperatur und Dauer eine höhere Fähigkeit besitzt den zunehmend gasförmigen Formaldehyd aufzunehmen. Es ist ersichtlich, dass das Bichsel-Popcorn bei einer Raumtemperatur von ca. 20 °C und unabhängig einer Zeitspanne von 1 h bzw. 3 h nur geringe Gewichtszunahmen von etwa 0,34 % bis 0,45 % aufweist. Bei einer Erhöhung der Temperatur auf 30 °C sind keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich des Gewichts auszumachen. Erst bei einer eingestellten Temperatur von 50 °C und einer Testdauer von 3 h sind leichte Gewichtszunahmen für das Bichsel-Popcorn erkennbar. Nach 3 h kann eine etwa 50 %-ige Gewichtszunahme des Popcorns registriert werden. Aus der Abbildung 13 ist weiter zu entnehmen, dass bei einer eingestellten Temperatur von 70 °C und einer Zunahme der Testdauer von 1 h auf 3 h die Gewichtszunahme für das Bichsel-Popcorn kontinuierlich steigt. Bei diesen Gewichtsänderungen handelt es sich, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, um signifikante Zunahmen. So zeigt sich, dass nach 1 h die Formaldehydaufnahme bei etwa 1 % liegt und diese nach 3 h auf 5,48 % ansteigt. Nach einer erneuten Temperaturerhöhung von 70 °C auf 103 °C ist zu erkennen, dass nach 1 h bzw. 2 h eine Aufnahmekapazität von ca. 4,39 % bzw. 6,10 % erreicht wird, wobei es sich hier um eine signifikante Steigerung der Formaldehydaufnahme handelt. Eine Ausweitung der Testdauer auf 3 h zeigt keine signifikanten Veränderungen mehr.

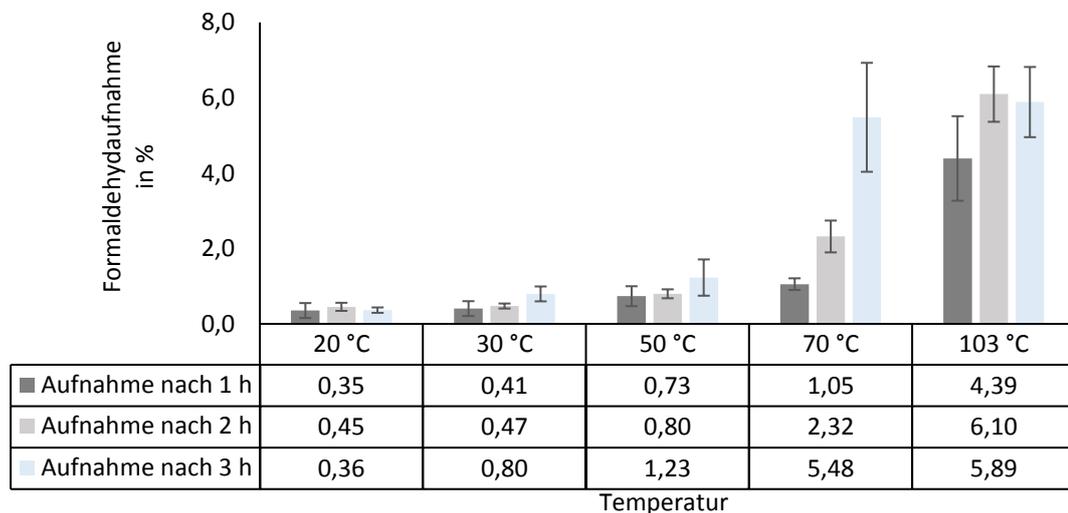


Abbildung 13: Formaldehydaufnahmefähigkeit von Bichsel-Popcorn nach 1 h, 2 h sowie 3 h bei unterschiedlichen Temperaturen.

Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass das Popcornmaterial (nach dreistündiger Formaldehydbegasung bei 103 °C) in der Lage ist wesentlich mehr Formaldehyd zu binden als Holz. Besitzt das Popcornmaterial nach der Begasung eine durchschnittliche Formaldehydabsorptionsfähigkeit von etwa 6,0 %, so zeigen dagegen die untersuchten

Fichtenholzspäne lediglich eine Aufnahmefähigkeit von 0,6 %. (Auf Grund der geringen Formaldehydaufnahmefähigkeit der untersuchten Holzspäne wird auf eine detaillierte Darstellung verzichtet). Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die Gewichtszunahme im Vergleich zum Popcornmaterial um den Faktor 10 geringer ausfällt. Eine mögliche Ursache für diese Unterschiede hinsichtlich der Affinität zum Formaldehyd liegt im Proteingehalt der Granulate begründet. So weist das Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn einen durchschnittlichen Proteingehalt von ca. 8 % bzw. 10 % auf, demgegenüber sind lediglich 1 % Proteine im Fichtenholz zu finden (SCHMIDT, 1994).

Die Bindung von Formaldehyd verläuft über zwei wesentliche Reaktionsschritte ab. Zu Beginn reagiert ein reaktives Wasserstoffatom einer Aminogruppe mit der Carbonylgruppe des Formaldehyds, hierdurch entsteht ein Aminomethylol-Derivat. Anschließend wird eine Quervernetzung der Proteine mit Hilfe der Methylolgruppen ausgebildet. Durch die Vernetzung der Formaldehydmoleküle mit den Aminogruppen der Proteine ist es möglich den Formaldehyd im Material zu binden, womit die Proteine als Formaldehydfänger wirken (MCGREGOR et al., 2006). Jedoch zeigt die Analyse, dass die Fähigkeit des Popcorns als Formaldehydfänger zu fungieren erst im Bereich von höheren Temperaturen wirkt. Bei Raumtemperatur ist das Material kaum in der Lage Formaldehyd zu binden. Es kann vermutet werden, dass während des Pressprozesses der popcornbasierten Verbundplatten und unter Verwendung eines formaldehydhaltigen Bindemittels weniger Formaldehyd nach Außen emittiert wird. Jedoch wird die Eigenschaft des Popcorns Formaldehyd zu binden während des Erkaltens der Platten nach und nach verloren gehen.

5.1.5 Bestimmung der Sorptionseigenschaften

Mit Hilfe dieser Untersuchung soll der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die physikalischen Eigenschaften der popcornbasierten Verbundplatten beurteilt werden (vgl. 3.2.5). Hierzu werden die Sorptionseigenschaften an Bichsel-Popcorn und Holzspäne sowie an Verbundplatten (vgl. 3.4.1, Tab. 11, Versuchsreihe III, Rohdichte 300 kg/m^3) ermittelt. Die Verbundplatten sind lediglich mit Harnstoffformaldehyd-Harz gebunden und enthalten kein Hydrophobierungsmittel.

Abbildung 14 zeigt, dass die untersuchten Proben bei variierender Luftfeuchtigkeit in der Lage sind Feuchtigkeit aufzunehmen bzw. abzugeben. In der Untersuchung werden die rel. Luftfeuchtigkeiten kontinuierlich von 65 % auf 25 % reduziert, um diese dann anschließend bis auf 85 % zu steigern (vgl. Kap. 3.2.5). Zwischen den eingestellten Luftfeuchten 85 % und 25 % zeigen Desorption (von 85 % RH auf 25 % RH reduziert) und Adsorption (von 25 % RH auf 85 % RH gesteigert) annähernd identische Kurvenverläufe, wobei das Popcorn, die Holzspäne sowie die

Verbundplatten während der Desorption etwas höhere Ausgleichsfeuchten aufweisen als während der Adsorption. Bei dem beobachteten Verhalten der Materialien gegenüber Feuchte könnte es sich um einen Hysterese-Effekt handeln. Die Kurven zeigen deutlich, dass die Materialien in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte unterschiedlich viel Feuchtigkeit bzw. Wasser, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist, aufnehmen.

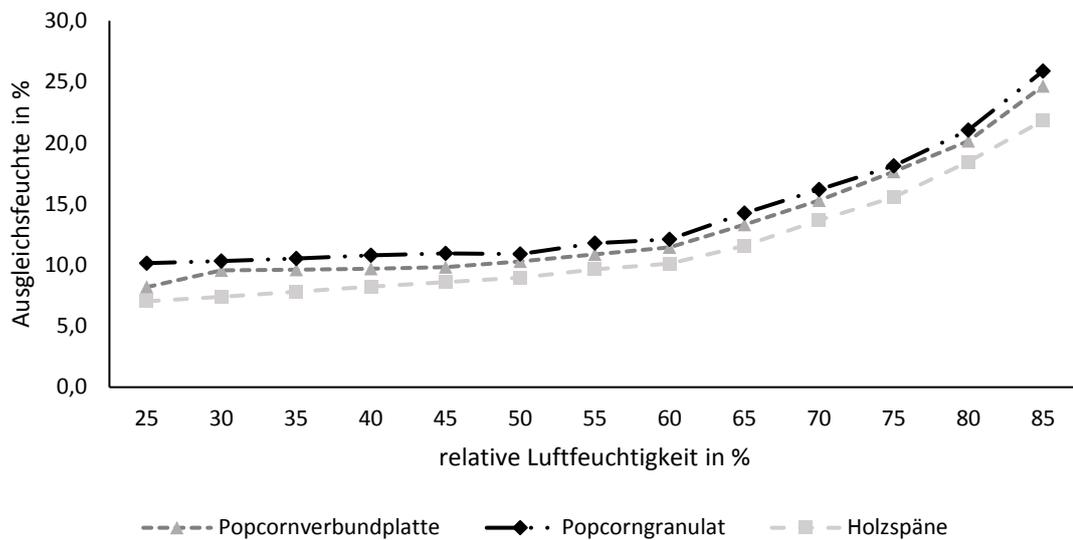


Abbildung 14: Adsorptionsverhalten von Popcornverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm), Popcorngranulat sowie Holzspänen bei 20 °C und variierenden rel. Luftfeuchtigkeiten (Adsorption von 25 % bis 85 % rel. Luftfeuchte).

In der Literatur wird bei Holz und Holzwerkstoffen ebenfalls auf einen Hysterese-Effekt hingewiesen. Dieser Effekt entsteht zwischen Adsorption und Desorption und beträgt in etwa 2 % (NIEMZ, 1993). Der größte Unterschied zwischen den Kurvenverläufen der Popcornverbundplatten liegt bei 65 % rel. Luftfeuchte und beträgt in etwa 1 % . Folglich stellt sich bei den untersuchten Materialien Popcorn und Popcornverbundplatten ein schwächerer Effekt ein als bei Holz. Das affine Verhalten von Popcorn gegenüber Wasser kann durch die vielen luftgefüllten Poren erklärt werden. Hierdurch zeigt das Material deutliche hygroskopische Eigenschaften, die mitunter die Dimensionsstabilität des Verbundes bei variierenden Luftfeuchtigkeiten negativ beeinflussen können (vgl. Kap. 7.1.6). Der Vergleich zwischen Holzspänen und Popcorn zeigt, dass die untersuchten Späne stets 2 % bis 3 % niedrigere Ausgleichsfeuchten aufweisen als das Popcorngranulat. Diese Ergebnisse entsprechen Angaben aus der Lebensmittelindustrie, hiernach ist eine starke Feuchtigkeitsaufnahme bei Cerealien und damit einhergehend eine Qualitätsabnahme bekannt. Als Gegenmaßnahme zur Feuchtigkeitsmigration wird häufig ein Coating auf Basis von Polysacchariden oder Proteinen auf den Cerealien eingesetzt (SORGATZ, 2011).

5.1.6 Bestimmung der Dimensionsstabilität und Feuchteaufnahme bei definierten Temperaturen und rel. Luftfechtigkeiten

Die Dimensionsstabilität eines neu entwickelten Werkstoffes ist für die Bestimmung des Anwendungsbereiches und eines möglichen Verwendungszweck von hoher Bedeutung, denn die Dimensionsstabilität gibt Auskunft über die Fähigkeit eines Werkstoffes bei wechselndem Umgebungsklima die Form (Länge, Breite, Dicke) zu halten. Diese Platteneigenschaft ist von besonderer Wichtigkeit, da die Maßänderungen nicht nur eine Verformung des zukünftigen Produktes hervorrufen, sondern hierdurch auch die Festigkeiten reduziert werden (KOLLMANN und DOSOUDIL, 1978). Typisches Verhalten von Holz bzw. Holzwerkstoffen gegenüber Feuchte ist das Quellen bzw. Schwinden, wobei die Maßänderungen stark von der Holzart bzw. vom Holzwerkstoff sowie von den eingesetzten Bindemitteln abhängig sind (SCHNEIDER, 1973; HAPLA und BRÜCK, 1997). Aus der Literatur ist bekannt, dass die Dimensionsstabilität von Werkstoffen von der chemischen Zusammensetzung des Materials, der Faserorientierung aber auch von den eingesetzten Bindemitteln sowie den Bearbeitungsmethoden abhängt (NIEMZ und POBLETE, 1996; OBATAYA et al., 2001; POPPER et al., 2005).

Innerhalb dieser Untersuchung wird geprüft wie sich unterschiedliche Umgebungsbedingungen in Form hoher Temperaturen (25 °C, 30 °C bzw. 35 °C) und rel. Luftfeuchten (75 %, 80 %, 82 %, 85 %) auf die popcornbasierten Prüfkörper auswirken. Hierzu werden die Gewichts-, Längen- sowie Dickenänderungen in definierten Zeitabständen (3 h, 6 h, 24 h, 48, 72 h) bestimmt (vgl. 3.2.6). In Abbildung 15 sind die Feuchteaufnahmen der Popcornverbundplatten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Verbundplatten bei 35 °C und den definierten Luftfeuchten immer höhere Mengen an Feuchtigkeit aufnehmen als bei niedrigeren Temperaturen und den entsprechenden rel. Luftfeuchten.

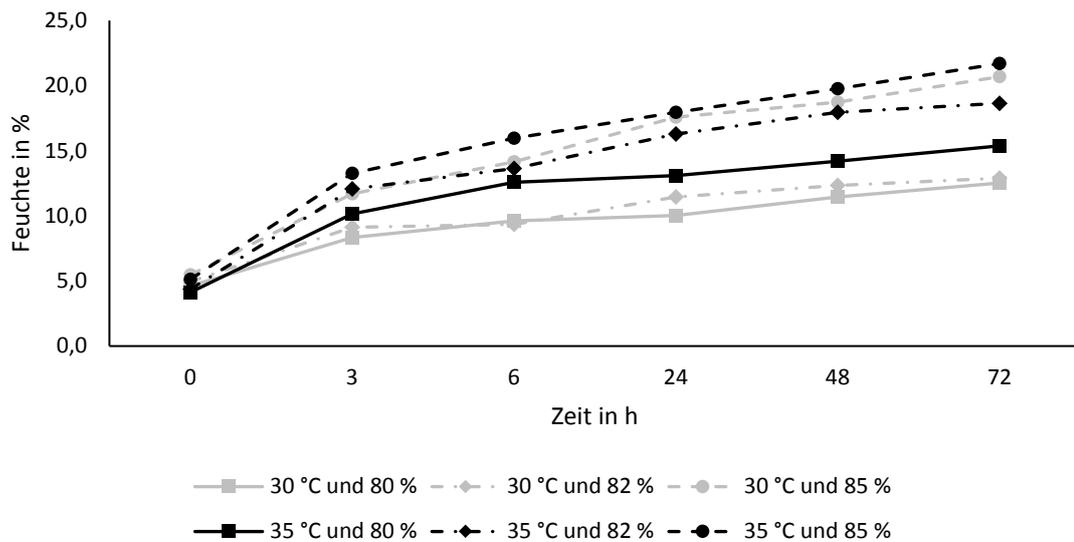


Abbildung 15: Sorptionsverhalten der Popcornverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) in Abhängigkeit der Temperaturen (30 °C bzw. 35 °C), rel. Luftfeuchten (80 %, 82 % sowie 85 %) und definierten Zeiteinheiten.

Zu Beginn der Untersuchung liegen die ermittelten Feuchten in den Prüfkörpern bei etwa 5,0 % und werden durch die erhöhten Temperaturen von 30 °C bzw. 35 °C sowie rel. Luftfeuchten von 85 % auf 20,0 % bzw. 21,0 % Feuchtegehalt in den Prüfkörpern gesteigert. Weiter zeigt sich, dass der Feuchtegehalt in den Prüfkörpern während der Untersuchung kontinuierlich steigt, wobei die größte Steigerung am Anfang in der untersuchten Zeitspanne von 0 h auf 3 h liegt. Im Laufe der Untersuchung nimmt die Stärke der Feuchtigkeitsaufnahme etwas ab. Es kann festgehalten werden, dass bei höheren Temperaturen die Materialien tendenziell mehr und in einer höheren Geschwindigkeit Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen als bei niedrigeren.

Bei Betrachtung der Dimensionsstabilität, also die Fähigkeit bei wechselndem Klima die Form beizubehalten, fällt auf, dass die hohen Temperaturen und Feuchtigkeiten nicht nur zu einer enormen Feuchtigkeitsaufnahme innerhalb des Prüfkörpers führen, sondern gleichzeitig auch einen immensen Einfluss auf die Gestalt des Prüfkörpers haben (vgl. Tab. 20, Abb. 16). Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Verbundplatten ohne Hydrophobierungsmittel hergestellt wurden. Ein Einsatz von Hydrophobierungsmittel während der Plattenherstellung könnte die Formänderung reduzieren oder verlangsamen. Abbildung 16 veranschaulicht die Wirkung der hohen Luftfeuchtigkeiten auf die Verbundplatten, Normalerweise bewirkt eine hohe rel. Luftfeuchte ein Quellen von Werkstoffen, doch im Falle der popcornbasierten Verbundplatten nehmen die Maße der Prüfkörper bei länger andauernder hoher Luftfeuchtigkeit ab. Die Untersuchungen zeigen, dass unabhängig von der Temperatur der Beginn des Schwindens zwischen 80 % und 82 % rel. Luftfeuchte liegt.

Aus Tabelle 20 geht hervor, dass die Temperatur eine negative Wirkung auf die Dimensionsstabilität hat. Bei einer Temperatur von 25 °C und 82 % rel. Luftfeuchte setzt bereits ein Schwinden ein und führt zu einer 3 %-igen Längenänderung.

Tabelle 20: Effekt von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit nach 96 h auf die Längen, Breiten sowie Dicken der popcornbasierten Verbundplatten (Rohdichte 300 kg/m³; Dicke 20 mm)

Temperatur in °C	rel. Luftfeuchte in %	Längenänderung in %	Breitenänderung in %	Dickenänderung in %
25	75	0,0	0,0	0,0
	80	-1,6	-1,9	-0,6
	82	-2,9	-2,5	-1,5
	85	-15,3	-14,9	-5,2
30	75	-0,6	-1,0	-3,8
	80	-0,9	-3,2	-3,3
	82	-15,4	-13,1	-6,9
	85	-24,8	-24,4	-8,8
35	75	-0,6	-1,4	-3,9
	80	-2,4	-3,8	-3,1
	82	-15,6	-16,6	-6,9
	85	-25,2	-22,5	-9,7

Eine Erhöhung der Temperatur auf 30 °C bzw. 35 °C bei gleichbleibender rel. Luftfeuchte bewirkt einen drastischen Rückgang der Dimensionsstabilität und ein Schwinden um ca. 15 %. Neben Temperatur und rel. Luftfeuchte besitzt auch die zeitliche Komponente einen deutlichen Einfluss auf die Verbundplatten. Es zeigt sich, dass bereits nach 6 h eine Längenänderung von etwa 3 % bei 35 °C und 85 % rel. Luftfeuchte auftritt und mit Verlauf der Untersuchung der Verlust der Form kontinuierlich zunimmt. Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich hierbei um eine nicht lineare Regression handelt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass popcornbasierte Verbundplatten keine vergleichbaren Dimensionsstabilitäten wie bspw. Holzwerkstoffe besitzen und sich folglich für eine Anwendung im feuchten Bereich mit hohen rel. Luftfeuchten nicht eignen. Für eine zukünftige Anwendung muss eine wasserundurchlässige Beschichtung in Betracht gezogen werden. Hierfür kommen verschiedene Beschichtungsmöglichkeiten, die eine Diffusionssperre gegenüber Wasser besitzen, in Frage. Zur Klärung dieser Problematik wird in ersten Versuchen von FRANK (2016) in einer Masterarbeit geprüft, ob Epoxidharze bzw. Polyurethane geeignet sind, die Dimensionsstabilität der Verbundplatten gegenüber Feuchte zu erhöhen. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Ummantelung einer Verbundplatte deutlich positiv auf die Dimensionsstabilität auswirkt und so verbessert werden kann (FRANK, 2016). Zur Klärung sind

jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig. Neben einer Ummantelung der Popcornverbundplatten mit Feuchteabweisenden Mitteln kann auch ein Einsatz von Hydrophobierungsmitteln in Betracht gezogen werden. Nach ROFFAEL und SCHNEIDER (1983) sowie RITTER (2012) kann durch die Zugabe von hydrophoben Bestandteilen in das Bindemittel die Dimensionsstabilität verbessert bzw. die Wasseraufnahme reduziert werden. Vermutlich könnten die hygroscopischen Eigenschaften des Popcorngranulats deutlich durch das Aufbringen eines Hydrophobierungsmittels auf das Granulat herabgesetzt werden, sodass eine höhere Dimensionsbeständigkeit erreicht werden könnte.

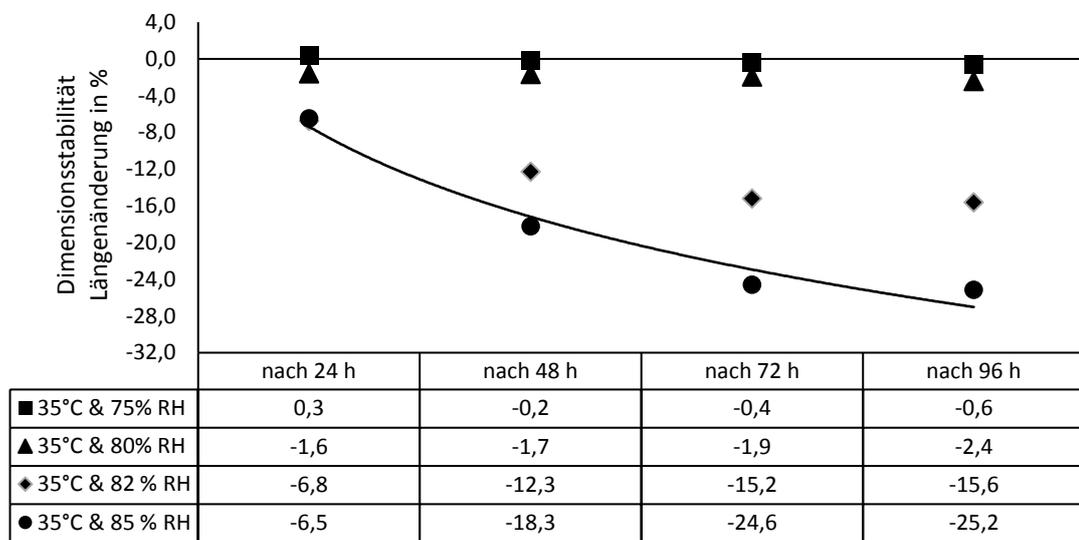


Abbildung 16: Längenänderung von popcornbasierten Verbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 , Dicke 20 mm) in Abhängigkeit von Temperatur ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) und variierenden Luftfeuchten (75 % bis 85 %) nach 24 h, 48 h, 72 h sowie 96 h.

5.1.7 Bestimmung der Formaldehydemissionen in der Holzwerkstoffindustrie

Bei der Entwicklung einer neuartigen, leichten Sandwichplatte müssen auch die gesundheitsgefährdenden Formaldehydemissionen berücksichtigt werden, wenn formaldehydhaltige Bindemittel zum Einsatz kommen. Seit April 2015 wird nach Verordnung EU 605/2014 Formaldehyd als karzinogen und mutagen in die Kategorie 1B eingestuft und muss folglich entsprechend gekennzeichnet werden (ECO-INSTITUT, 2014). In Europa ist die Prüfkammermethode nach EN 717-1 als Referenzverfahren ausschlaggebend, hiernach dürfen die Emissionen von Holzwerkstoffen den E1 Grenzwert von $0,1 \text{ ppm}$ nicht überschreiten (MARUTZKY, 2012). Jedoch sind für weltweit operierende Unternehmen auch die Grenzwerte anderer Regionen von Bedeutung. Derzeit gelten die strengsten Anforderungen an Holzwerkstoffproduzenten in Japan mit der dort zum Einsatz kommenden Emissionsklasse F**** (F Four Star). Der F****-Grenzwert liegt mit $0,3 \text{ mg/l}$ ($0,026 \text{ ppm}$) deutlich unterhalb der

europäischen Anforderungen an Holzwerkstoffe. Neben der 1 m³-Kammermethode kommt in dieser Arbeit die Gasanalyse (EN 717-2) zum Einsatz, um die Verbundplatten hinsichtlich der Formaldehydemission zu charakterisieren.

5.1.7.1 Bestimmung der Formaldehydemissionen nach der 1 m³-Kammermethode (EN 717-1)

In den Abbildungen 17 und 18 sind die Formaldehydemissionen für Popcornverbundplatten mit einer Rohdichte von 200 kg/m³ und einer Dicke von 20 mm dargestellt (vgl. Kap. 3.2.7.1). Die hergestellten Verbundplatten weisen Bindemittelanteile von 4 %, 6 % sowie 8 % der formaldehydhaltigen Bindemittel Kaurit 350 bzw. 340 (bez. auf atro Popcorn) auf. Den beiden Abbildungen 17 und 18 kann entnommen werden, dass die Formaldehydemissionswerte der Verbundplatten insgesamt sehr niedrig ausfallen. Bereits zu Beginn der Untersuchungen liegen alle Werte, unabhängig vom Bindemittel und Beleimungsgrad, unterhalb des E1 Grenzwertes von 0,1 ppm (MARUTZKY, 2012). Die höchsten Emissionen werden durchgängig an den Verbundwerkstoffen mit einem Bindemittelseinsatz von 8 % gemessen, gefolgt von den Platten mit einem 6 %-igen bzw. 4 %-igen Beleimungsanteil. Wobei beachtet werden muss, dass die mit K 350 gebundenen Popcornverbundplatten höhere Emissionswerte erzielen als die mit dem formaldehydärmeren Bindemittel K 340. Die Platten mit einer Beleimung von 8 % (K 350) weisen zu Beginn der Untersuchungen eine Anfangskonzentration knapp unter 0,1 ppm auf und bereits nach ca. 19 Tagen wird eine Ausgleichskonzentration mit 0,04 ppm erreicht (vgl. Abb. 17). Ferner erreichen die Verbundplatten mit einem Beleimungsanteil von 6 % bzw. 4 % (K 350) einen Formaldehydemissionswert von 0,08 ppm bzw. 0,06 ppm und weisen somit niedrigere Anfangskonzentrationen auf als die Variante mit einem Beleimungsanteil von 8 %. Mit Verlauf der Untersuchung fällt auf, dass sich die anfänglichen Unterschiede der Verbundplatten hinsichtlich der Formaldehydabgabe zunehmend angleichen.

Abbildung 18 zeigt die Formaldehydemissionswerte der mit K 340 gebundenen Verbundplatten und es ist ersichtlich, dass die gemessenen Konzentrationen ebenfalls schon zu Beginn der Untersuchungen deutlich unterhalb der gesetzlich erlaubten Emissionen von 0,1 ppm liegen. Auch die mit K 340 hergestellten Verbundplatten und einem Bindemittelanteil von 8 % weisen, gefolgt von der 6 %- und 4 %-igen Beleimung, die höchsten Formaldehydkonzentrationen mit ca. 0,06 ppm auf. Innerhalb einer Zeitspanne von 300 h (ca. 13 Tage) sind für alle Beleimungsvarianten die Formaldehydwerte auf fast null gesunken. Die Ergebnisse zeigen, dass die hergestellten Popcornverbundplatten in Kombination mit dem Kaurit-Harz 340 Emissionswerte erreichen, die unterhalb des Grenzwerts der EPF (European Panel Federation) mit 0,065 ppm liegen. Sogar die strengen japanischen Emissionsklasse F**** (F Four Star) mit

0,3 mg/l (0,026 ppm) werden von den Platten unterboten (PARK et al., 2010). Hieraus kann geschlossen werden, dass die popcornbasierten Platten so gut wie kein Formaldehyd emittieren. Die Emissionen der entwickelten Verbundplatten sind wie die Untersuchungen zeigen sehr gering, doch das Anliegen eine Platte zu entwickeln, die keinerlei Formaldehydemissionen besitzt, ist aller Wahrscheinlichkeit nicht erreichbar. Grund hierfür ist, dass es sich bei Formaldehyd um ein natürlich vorkommendes Molekül handelt, das aus vielen organischen Materialien entweichen kann. So besitzt Holz zwar einen geringen, aber immer noch messbaren, natürlichen Gehalt an Formaldehyd (MARUTZKY und ROFFAEL, 1977; ROFFAEL et al., 2012). Es besteht jedoch die Möglichkeit die Emissionen der UF-Harz gebundenen Popcornplatten durch Einsatz bestimmter Verfahren noch weiter zu reduzieren. Hierzu werden in der Literatur neben formaldehydarmen bzw. -freien Bindemitteln unter anderem das Einbringen von Formaldehydfängern (Harnstoff, Tannine, Melamin, etc.) sowie die Applikation von Diffusionssperren bzw. eine nachträgliche Beschichtung der Platten angeführt (DUNKY UND NIEMZ, 2002; DIX, 2014). In weiterführenden Versuchen müsste geprüft werden, in wieweit die bereits bekannten Methoden zur Reduzierung der Formaldehydemissionen auf die popcornbasierte Verbundplatte angewendet werden können.

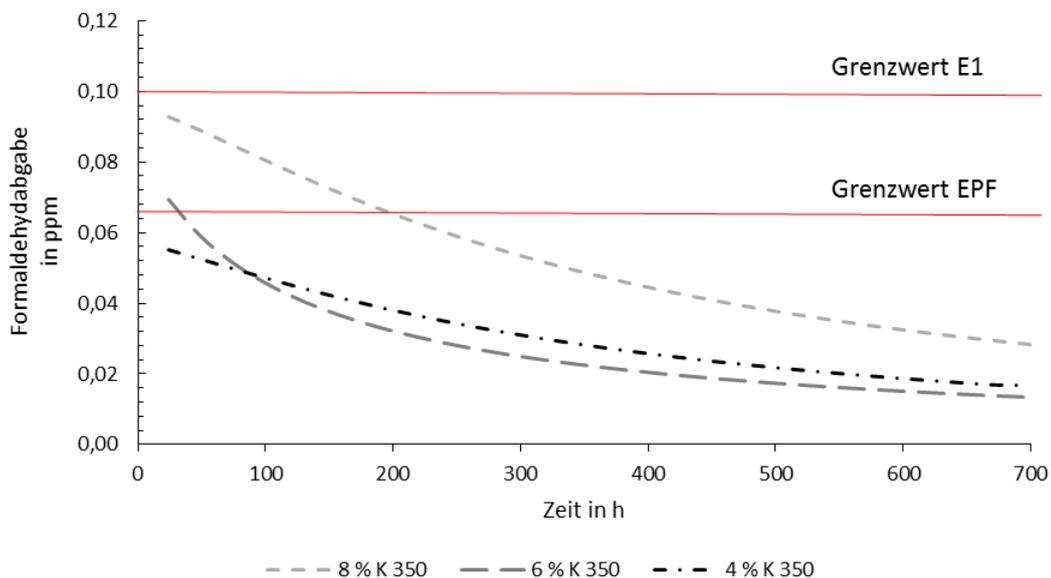


Abbildung 17: Formaldehydemissionen nach der Kammermethode von UF-Harz (K 350) gebundenen Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) mit Bindemittelanteilen von 4 %, 6 % sowie 8 %.

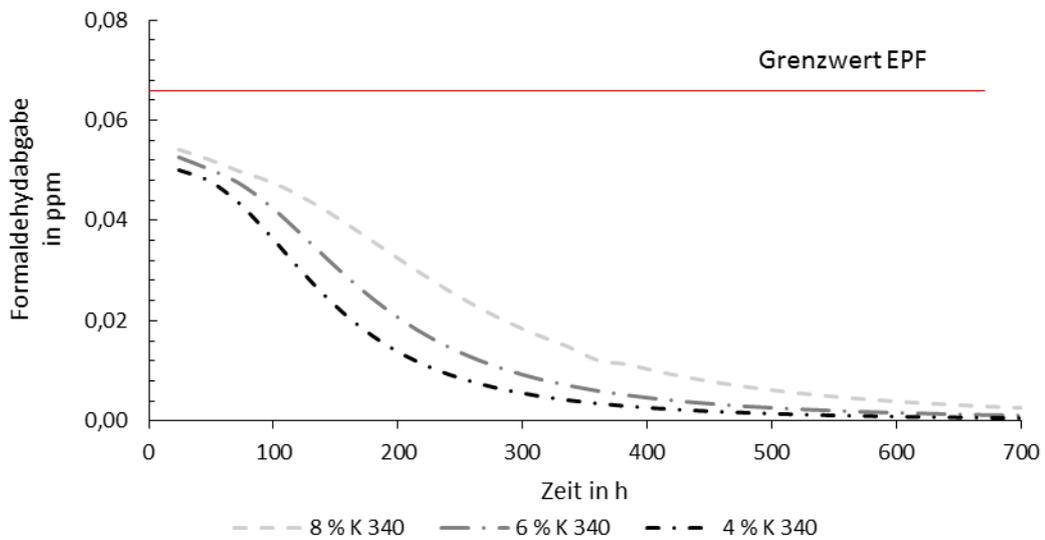


Abbildung 18: Formaldehydemissionen nach der Kammermethode von UF-Harz (K 340) gebundenen Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) mit Bindemittelanteilen von 4 %, 6 % sowie 8 %.

5.1.7.2 Bestimmung der Formaldehydemissionen nach der Gasanalyse (EN 717-2)

Die Untersuchungen zeigen, dass die Formaldehydemissionen deutlich vom Gehalt des Formaldehyds im Bindemittel abhängig sind. Mit Hilfe der Gasanalyse werden verschiedene Verbundplatten (Rohdichte 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm bzw. 30 mm) geprüft, die mit Kaurit 340 bzw. Kaurit 350 (Beleimungsanteil: Festharz 8 % bez. auf atro Popcorn) hergestellt wurden (vgl. Kap. 3.4.1 Versuchsreihe IV). Die mit Hilfe des formaldehydarmen Bindemittels Kaurit 340 gebundenen Platten zeigen – unabhängig der Rohdichte – sehr niedrige Emissionswerte von ca. $0,6 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^2$ (vgl. Tab. 21). Dagegen liegen die Emissionswerte der Kaurit 350 gebundenen Platten mit $1,52 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^2$ um ca. 120 % höher. Die Untersuchung zeigt zudem, dass diese Analyse der Formaldehydemissionen nicht von der Rohdichte der Platten abhängig ist, sondern vielmehr von der Oberfläche und der Verdichtung der Schichten. Durch eine höhere Plattendicke wird die Rohdichte in den einzelnen Schichten reduziert und der Formaldehyd kann leichter durch die Platte diffundieren. Es muss beachtet werden, dass bei dieser Untersuchung nur ein sehr geringer Probenumfang untersucht werden konnte und somit weitere Prüfungen zur Klärung der Formaldehydproblematik getätigt werden müssen.

Aber auch diese Untersuchung bestätigt wie zuvor die Bestimmung der Formaldehydemissionen mit Hilfe der 1 m^3 -Kammermethode (717-1), dass die ermittelten Emissionen von den rohdichtereduzierten Platten im Vergleich zu herkömmlichen Holzwerkstoffen gering ausfallen. Die Grenzwerte für beschichtete Spanplatten bzw. Sperrhölzer (Sofortprüfung) liegen bei $3,5 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^2$ bzw. $5,0 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^3$ und werden deutlich von den Verbundwerkstoffen untertroffen

(DIBT, 1994). Auf Grund des geringen Bindemittelanteils, der für die Herstellung der leichten Verbundplatten nötig ist, sowie der reduzierten Rohdichte entweichen nur geringe Mengen des gesundheitsschädlichen Formaldehyds aus den Platten.

*Tabelle 21: Formaldehydemissionen von popcornbasierten Verbundplatten (Rohdichten 200 kg/m³ bzw. 300 kg/m³; Dicken 20 mm bzw. 30 mm) nach DIN EN 717-2; Grenzwert für beschichtete Spanplatten bzw. Sperrhölzer 3,5 mg/h*m² bzw. 5,0 mg/h*m²*

Verbundplatte	Bindemittel	Rohdichte in kg/m ³ / Dicke in mm	Formaldehydemission in mg/h*m ²
Verbundplatte	Kaurit 340	200/20	0,68
		200/30	0,69
		300/20	0,62
		300/30	0,83
Verbundplatte	Kaurit 350	200/20	1,52
		200/30	1,97
		300/20	1,67
		300/30	1,81

5.1.8 Bestimmung des Einflusses von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf die Formaldehydabgabe der Verbundplatten

Die Bestimmung der Formaldehydabgabe von Werkstoffen erfolgt häufig durch Anwendung des Referenzverfahrens „Kammermethode“ nach EN 717-1. Hierbei werden die zu prüfenden Platten einer konstanten Temperatur von 23 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 45 % über einen längeren Zeitraum ausgesetzt. Die untersuchten Werkstoffe werden anhand der in regelmäßigen Abständen gemessenen Formaldehydkonzentration in der Luft beurteilt. Bei der Beurteilung von Werkstoffen muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass diese während des Gebrauchs ganz unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein können. Folglich muss bedacht werden, welchen Einfluss unterschiedliche Klimata – in Form von hohen Temperaturen und hohen Luftfeuchtigkeiten – auf die Holzwerkstoffe und folglich auch auf deren Formaldehydabgaben haben können.

Bereits 1962 untersuchte WITTMANN die Auswirkung von Temperatur und Feuchtigkeiten auf die nachträglichen Formaldehydemissionen von Spanplatten. Auch FLEISCHER und MARUTZKY (2000) untersuchten die Bedeutung der Hydrolyse auf die Formaldehydfreisetzung von UF-Harz gebundenen Spanplatten sowie von reinen UF-Harzen. In der Literatur wird immer wieder auf einen Zusammenhang zwischen Materialfeuchte bzw. Luftfeuchtigkeit und den Formaldehydemissionen aus den Werkstoffen hingewiesen. Ferner wird erwähnt, dass die Temperatur oft eine beschleunigende bzw. steigernde Wirkung auf die Formaldehydabgabe besitzt (FRIHART et al., 2012).

Die an den popcornbasierten Verbundplatten durchgeführten Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3.2.7.3) zeigen, dass die Formaldehydabgabe von mehreren Faktoren gleichzeitig beeinflusst wird. Allgemein zeigen die Untersuchungen, dass die Abgabewerte mit zunehmender Feuchtigkeit und andauernder Testphase steigen. Aus Tabelle 22 sowie Abbildung 19 kann entnommen werden, dass bei einer Temperatur von 30 °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 35 % nach 24 h bzw. 96 h nur sehr geringe Abgabewerte (nach modifizierter Flaschen-Methode) von 4,1 mg/1000 g Material bzw. 10,1 mg/1000 g Material gemessen werden. Eine Erhöhung der Temperatur auf 40 °C hat jedoch einen deutlichen Anstieg der Emissionen zur Folge. So betragen nach 24 h bzw. 96 h die Formaldehydabgabewerte etwa 7,4 mg/1000 g bzw. 32,5 mg/1000 g. D. h. die Emissionen sind durch eine Temperaturerhöhung von 10 °C bereits nach 24 h um etwa 75 % bzw. nach 96 h um ca. 220 % höher. Weiter zeigt sich, dass unabhängig von der Temperatur die Emissionen mit Erhöhung der rel. Luftfeuchten kontinuierlich steigen. Wobei die größten Steigerungen von 48 h auf 96 h bei einer Temperatur von 40 °C zu verzeichnen sind.

Tabelle 22: Formaldehydabgabe (mg/1000 g Material) von popcornbasierten, UF-Harz gebundenen Verbundplatten (300 kg/m³; Dicke 20 mm) ermittelt nach einer modifizierten Ausführung der EN 717-3 bei definierten Temperaturen (30 °C, 40 °C), rel. Luftfeuchten (RH: 35 %, 75 %, 85 %, 100 %) und Zeiten (24 h, 48 h, 96 h). Bindemittelanteil: Festharz 8 % bez. auf atropopcornmaterial (vgl. Kap. 3.2.7.3 Versuchsreihe IV)

Bindemittel	Temperatur in °C	Zeit in h	35 % RH	75 % RH	85 % RH	100 % RH
K 350	30	24	4,1	9,5	15,2	22,0
		48	6,0	14,1	25,4	33,3
		96	10,1	24,2	36,9	58,1
	40	24	7,4	26,8	38,1	61,0
		48	18,8	44,8	69,1	89,4
		96	32,5	93,0	156,7	176,5
K 340	30	24	2,6	8,0	11,7	18,4
		48	3,8	12,5	15,9	25,8
		96	10,3	23,0	28,4	50,2
	40	24	10,7	17,0	25,0	42,0
		48	12,4	28,2	49,5	69,6
		96	22,6	65,0	96,5	165,4

Die Prüfkörper nehmen auf Grund der hygroskopischen Materialstruktur Feuchtigkeit aus der Luft auf (vgl. Kap. 5.1.5) und folglich nimmt die Feuchtigkeit mit steigender Luftfeuchte in den Prüfkörpern zu. Ausgelöst durch die Gegenwart von Wasser wird die Umkehrung der Kondensationsreaktion zwischen Formaldehyd und Harnstoff durch Hydrolyse wahrscheinlich. Die Spaltung der Harnstoff-Formaldehydbindungen ist ursächlich dafür, dass vermehrt Formaldehyd emittiert wird (FLEISCHER und MARUTZKY, 2000). Neben der Feuchtigkeit wirkt die

Temperatur beschleunigend auf die Durchführung der Reaktion. Diese Beobachtungen, dass die Formaldehydemissionen durch Feuchtigkeit und Temperatur beeinflusst bzw. verstärkt werden, bestätigen MYERS und NAGAOKA (1981) an untersuchten UF-gebundenen Spanplatten.

Gleichzeitig weisen FLEISCHER und MARUTZKY (2000) darauf hin, dass die beschleunigende Wirkung einer erhöhten Temperatur auf die Hydrolyse sowie Formaldehydabgabe nur eine kurze Zeitspanne andauert. Aus den Untersuchungen zur Formaldehydfreisetzung aus Spanplatten ist nur in den ersten Minuten ein deutlicher Einfluss der Temperatur auf die Formaldehydemission zu erkennen. Es wird zudem herausgearbeitet, dass es sich bei der Hydrolyse um einen vielschichtigen Prozess handelt. Hierbei wirken mehrere Faktoren wie bspw. Vernetzungsgrad des Leimes, Mol-Verhältnis zwischen Harnstoff und Formaldehyd sowie Presszeiten auf die Abgabe des Formaldehyds (FLEISCHER und MARUTZKY, 2000).

Da sich der formaldehydbasierte Harz K 340 (F : U von 1,0 : 1,0) durch ein reduziertes Molverhältnis gegenüber K 350 (F : U von 1,16 : 1,00) auszeichnet, werden die Auswirkungen der Molverhältnisse auf die Formaldehydemissionen anhand dieser Bindemittel untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass die Verbundplatten abhängig vom Bindemittel und des verwendeten Molverhältnisses deutlich unterschiedliche Mengen an Formaldehyd emittieren. Aus der Tabelle 22 wird deutlich, dass bei 30 °C die Unterschiede hinsichtlich der Formaldehydemissionen, verursacht durch die verwendeten Bindemittel, nur geringfügig sind.

Erst nach einer Temperaturerhöhung von 30 °C auf 40 °C zeigt sich, dass die Verbundplatten gebunden mit K 340 deutlich geringere Emissionen abgeben. Die Unterschiede bei den gemessenen Formaldehydabgaben sind nach einer Zeitspanne von 24 h bzw. 48 h innerhalb der unterschiedlichen Luftfechtigkeiten relativ gering. Erst eine Testdauer von 96 h zeigt bei allen untersuchten Luftfechtigkeiten (35 %, 75 %, 85 %, 100 %) deutliche Unterschiede. Nach 96 h weisen die mit K 340 gebundenen Platten bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 35 % bzw. 100 % lediglich Abgabewerte von 10,7 mg/1000 g bzw. 165,4 mg/1000 g auf. Hingegen weisen die mit K 350 gebunden Platten höhere Abgabewerte mit etwa 32,5 mg/1000 g bzw. 176,5 mg/1000 g auf. Folglich scheint sich die Vernetzung des Bindemittels auf die nachträgliche Formaldehydabgabe auszuwirken.

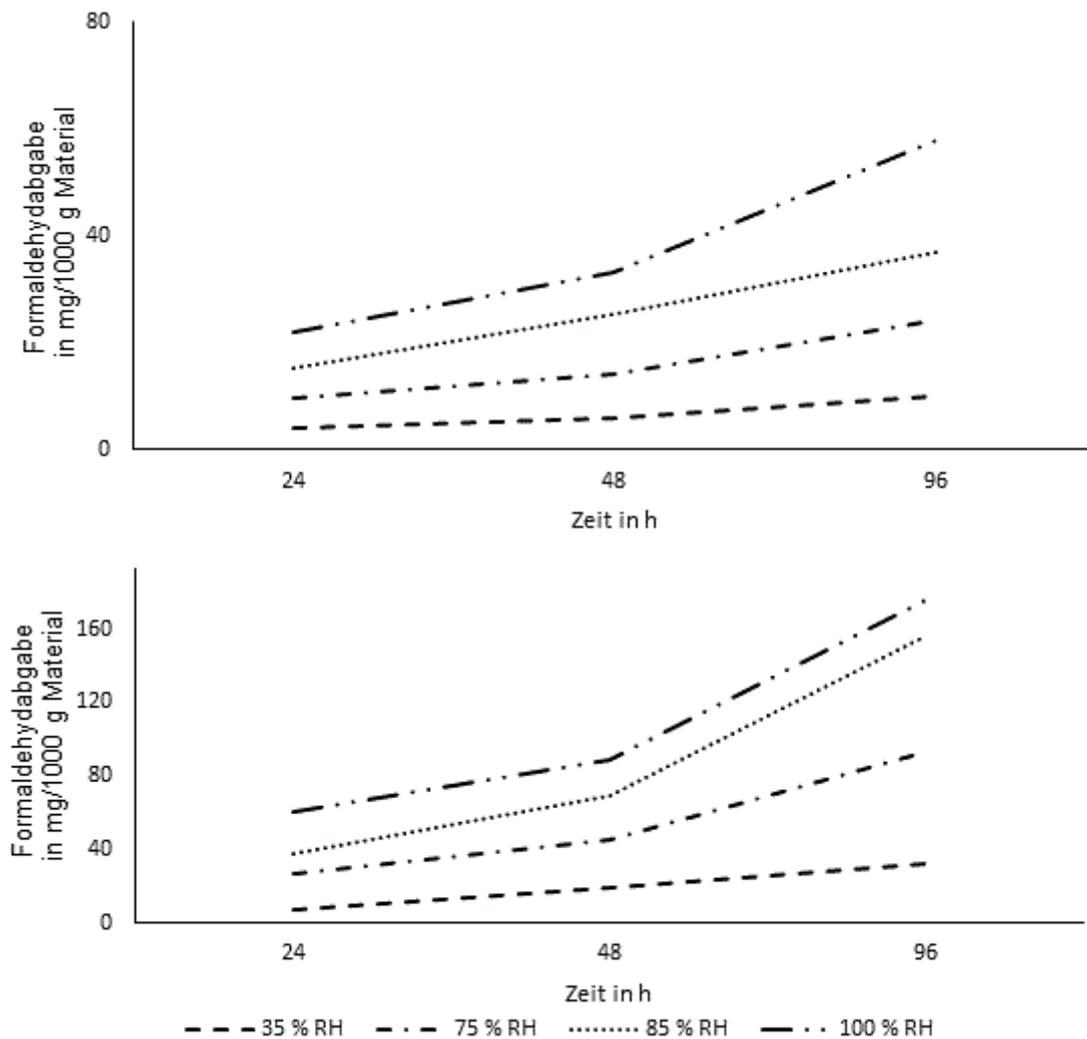


Abbildung 19: Formaldehydabgabe von popcornbasierten, UF-Harz gebundenen Verbundplatten (K 350; Rohdichte 300 kg/m^3 , Dicke 20 mm) ermittelt nach einer modifizierten Ausführung der EN 717-3 bei definierten Temperaturen (oben: $30 \text{ }^\circ\text{C}$ und unten: $40 \text{ }^\circ\text{C}$), rel. Luftfeuchtigkeiten (RH: 35 %, 75 %, 85 %, 100 %) und Zeitspannen (24 h, 48 h bzw. 96 h). Bindemittelanteil: Festharz 8 % bez. auf atro Popcornmaterial (vgl. Kap. 3.2.7.3 Versuchsreihe IV).

5.1.8.1 Zusammenfassung der chemisch-physikalischen Untersuchungen

Aus der chemisch-physikalischen Untersuchung des Popcorngranulates und der Popcornverbundplatten geht hervor, dass

- die Schüttdichte des untersuchten Popcornmaterials (Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn) mit ca. 46 kg/m^3 bis 64 kg/m^3 sehr niedrig ist und zudem deutlich unterhalb der Schüttdichte von Deckschicht- bzw. Mittelschichtspänen mit $170,4 \text{ kg/m}^3$ bzw. $119,3 \text{ kg/m}^3$ liegt. Auf Grund der niedrigen Schüttdichte ist die Ausformung von leichten Verbundplatten möglich.

-
- sich die Popcorngranulate hinsichtlich des pH-Wertes und der Pufferkapazität nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Der pH-Wert für Mikrowellen- bzw. Bichsel-Popcorn liegt bei etwa 5,2 bzw. 5,5 und die Pufferkapazität beträgt 2,6 mmol bzw. 2,8 mmol NaOH/100 g.
 - das Popcornmaterial einen Proteingehalt zwischen 8 % und 10 % aufweist und hierdurch die Fähigkeit besitzt, ab einer Temperatur von 70 °C, Formaldehyd zu absorbieren.
 - Popcorn ein hygroskopisches Material ist, das in der Lage ist durch Ad- und Desorption Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen bzw. abzugeben.
 - die rel. Luftfeuchtigkeit und Temperaturen einen großen Einfluss auf die Dimensionsstabilität der Verbundplatten haben. Hierbei zeigt sich, dass ab einer rel. Luftfeuchtigkeit von etwa 82 % ein Schrumpfprozess einsetzt.
 - die Formaldehydemissionen aus den Verbundplatten sehr niedrig sind. Bereits zu Beginn der Untersuchungen liegen die Emissionswerte (Kammer-Methode) unterhalb des E1 Grenzwertes von 0,1 ppm. Im Verlauf der Untersuchungen sinken die Emissionswerte auf Ausgleichskonzentration unterhalb F*** bzw. F****.

5.2 Mechanische und physikalische Eigenschaften der popcornbasierten Verbund- sowie Sandwichverbundplatten

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbundplatten sowie der Sandwichplatten vorgestellt und erläutert. Die ermittelten Ergebnisse geben Auskunft über die Qualität der entwickelten Platten und ermöglichen eine qualitative Bewertung mit einem direkten Vergleich von bereits auf dem Markt etablierten Werkstoffen. Bisher gibt es keine aussagekräftige Norm für Sandwichplatten, daher wird zur Evaluierung der Platteneigenschaften teilweise die DIN EN 312 für Spanplatten im Trockenbereich herangezogen. Diese Wahl wird getroffen, da ein möglicher Anwendungsbereich der Verbundplatten im Möbelsektor liegt.

5.2.1 Werkstoffprüfung der Popcornverbundplatten

Für die Entwicklung einer popcornbasierten Sandwichplatte steht zuerst die Fertigung einer leichten und schubfesten Popcornverbundplatte im Vordergrund. Um die Qualität der Platten beurteilen zu können, wird die innere Festigkeit des Verbundes mit Hilfe der Querkzugfestigkeit untersucht. Hierdurch kann geprüft werden, ob die Verbindung der Partikel gelungen ist und ein Zusammenhalt hergestellt werden konnte. Diese Prüfungsmethode ist geeignet, da auch während der Biegebeanspruchung einer Sandwichplatte Spannungen senkrecht zur Plattenebene auftreten können (PLATEMA, 1966).

5.2.1.1 Bestimmung der Querkzugfestigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses des Ausgangsmaterials werden gemäß Versuchsreihe I jeweils Platten mit einer Dichte von 200 kg/m^3 und 300 kg/m^3 aus Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn mit einem Bindemittelanteil von 8 % (bez. auf atro Popcorn) angefertigt und hinsichtlich der Querkzugfestigkeit untersucht (vgl. Kap. 3.4.1 Tab. 11).

Abbildung 20 ist zu entnehmen, dass die Fraktionsgrößen sowohl des Bichsel- als auch des Mikrowellen-Popcorns nur einen geringen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit der hergestellten Platten ausüben. Im Falle der Fraktionsgröße zeigt die statistische Auswertung, dass die Unterschiede nicht signifikant sind. Des Weiteren ist festzustellen, dass Popcornverbundplatten aus Bichsel-Popcorn in allen Fällen eine um ca. 11 % (200 kg/m^3 , Fraktion $\geq 4 \text{ mm}$) bis ca. 38 % (300 kg/m^3 , nicht fraktioniertes Popcorn) höhere Querkzugfestigkeit aufweisen als vergleichbare Platten aus Mikrowellen-Popcorn. Ferner weisen alle Plattenvarianten mit einer Dichte von 300 kg/m^3 erwartungsgemäß eine höhere Querkzugfestigkeit auf als Varianten mit einer Rohdichte

von 200 kg/m^3 . Grundsätzlich handelt es sich bei den Festigkeitsunterschieden, verursacht durch Materialwahl und Rohdichte, um signifikante Ergebnisse.

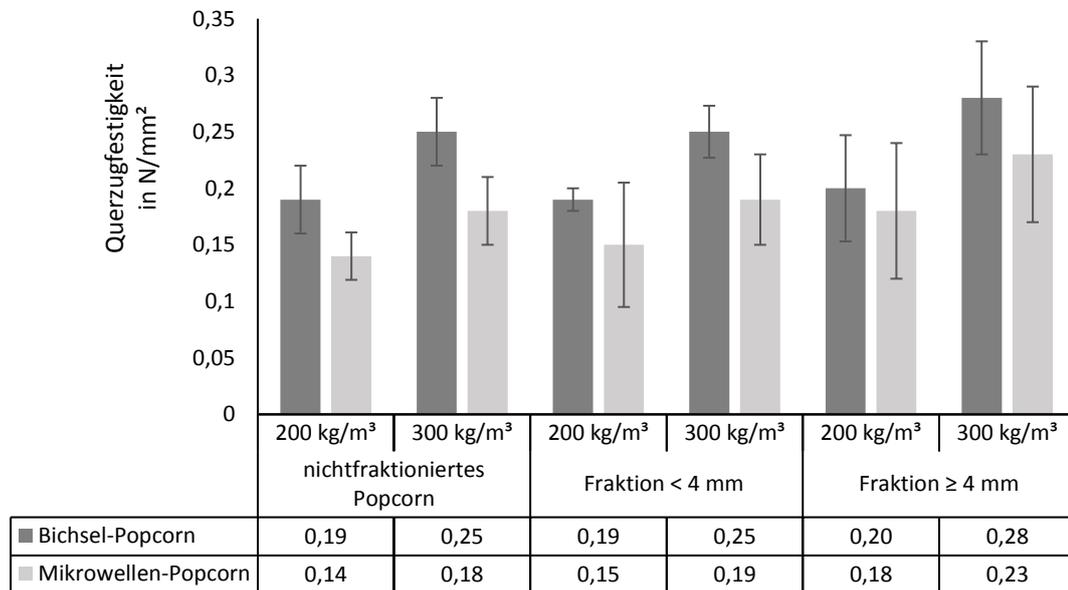


Abbildung 20: Querzugfestigkeiten der Verbundplatten (vgl. Kap. 3.4.1, Versuchsreihe I) aus unterschiedlich fraktioniertem Bichsel- bzw. Mikrowellen-Popcorn in den Rohdichten 200 kg/m^3 und 300 kg/m^3 .

Jedoch kann auf Grund der hohen Streuung in den Plattenvarianten der Fraktion $\geq 4 \text{ mm}$ keine Signifikanz ausgegeben werden. Eine mögliche Erklärung für die deutlich geringeren Festigkeiten der Verbundplatten aus Mikrowellen-Popcorn ist, dass die Partikelstruktur des Popcorns wesentlich inhomogener ist als die des Bichsel-Popcorns, da es keine geschlossene Mantelfläche aufweist. Des Weiteren konnten an den Querschnitten der Verbundplatten aus Mikrowellen-Popcorn Hohlräume beobachtet werden, die die Querzugfestigkeiten reduzieren. Diese Hohlräume waren für Verbunde aus Bichsel-Popcorn nicht nachweisbar. Zusätzlich befinden sich bei diesen Platten erhöhte Anteile an Maishäuten, die einen homogenen Plattenaufbau verhindern. Auf Grund dieser Ergebnisse wird in den weiteren Untersuchungen ausschließlich auf das Bichsel-Popcorn zurückgegriffen und ferner wird das Popcorn nicht weiter in Fraktionen separiert, das Material wird lediglich vom Staubanteil und von nicht aufgepufften Maisanteilen befreit.

5.2.1.2 Abhängigkeit der Querzugfestigkeit UF-Harz gebundener Popcornverbundplatten von den Pressparametern

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der Presstemperatur sowie des Presszeitfaktors auf die Aushärtung des verwendeten Bindemittels untersucht und erläutert (vgl. Kap. 3.4.1, Tab. 12; Versuchsreihe II.a). Hierzu werden für die Herstellung der Verbundplatten (200 kg/m^3) Temperaturen von 140 °C bis 200 °C sowie Presszeiten von $7,5 \text{ s/mm}$ bis $12,0 \text{ s/mm}$ ($2,5 \text{ min}$ bis

4 min) untersucht. Die Verbundplatten weisen einen Bindemittelanteil von 8 % (Festharz auf atro Popcorn) auf. Aus Abbildung 21 geht hervor, dass die Prüfung der Verbundplatten mit einer Presstemperatur von 140 °C sowie Presszeitfaktoren von 7,5 s/mm bis 12,0 s/mm die geringsten Festigkeiten erzielen, wobei sich die niedrigste Querkzugfestigkeit mit ca. 0,15 N/mm² bei einem Presszeitfaktor von 7,5 s/mm einstellt. Durch eine sukzessive Erhöhung des Presszeitfaktors von 7,5 s/mm auf 12,0 s/mm kann eine Steigerung der Querkzugfestigkeit auf 0,23 N/mm² erreicht werden. Ein Vergleich der erzielten Querkzugfestigkeiten bei den unterschiedlichen Presstemperaturen zeigt, dass sich bei den Temperaturen 160 °C, 180 °C sowie 200 °C die Querkzugfestigkeiten nicht signifikant voneinander unterscheiden (vgl. Abb. 21). So zeigt sich, dass bei einer Presstemperatur von 160 °C und bei Presszeitfaktoren von 7,5 s/mm bzw. 9,0 s/mm Festigkeiten von ca. 0,23 N/mm² erzielt werden. Durch eine Erhöhung des Presszeitfaktors auf 10,5 s/mm bzw. 12,0 s/mm, erfährt die Querkzugfestigkeit lediglich einen geringfügigen Anstieg um 8 % auf 0,25 N/mm². Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass sich mit 0,28 N/mm² die höchsten Querkzugfestigkeiten bei einer Presstemperatur von 180 °C und einem Presszeitfaktor von 10,5 s/mm einstellen. Durch eine Erhöhung der Temperatur auf 200 °C und abhängig vom Presszeitfaktor sinkt die Festigkeit der Verbundplatten hingegen auf ca. 0,25 N/mm² leicht ab.

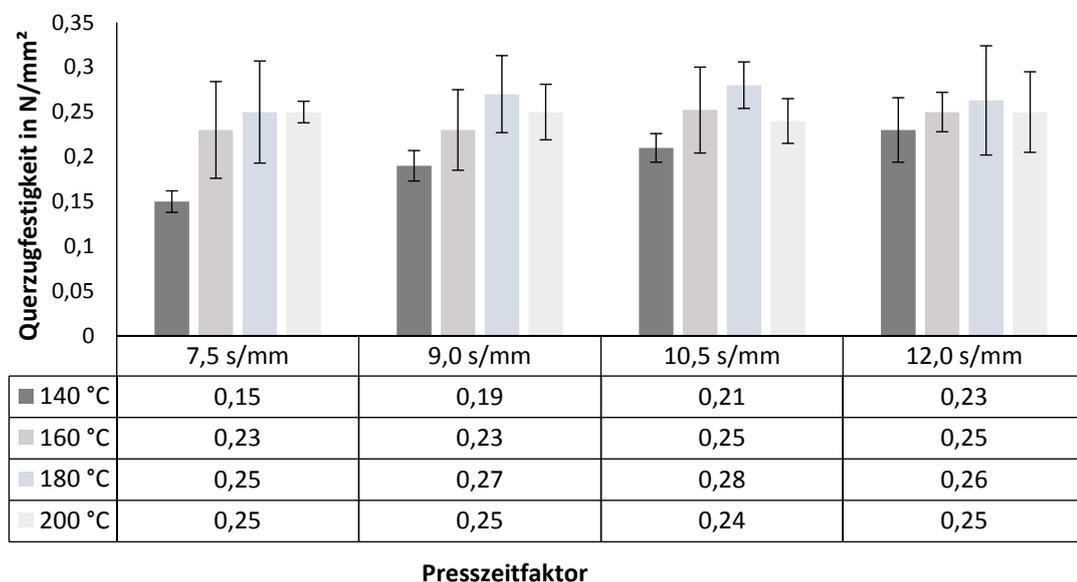


Abbildung 21: Mittlere Querkzugfestigkeiten von UF-Harz (K 350) gebundenen Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m³; Dicke 20 mm) in Abhängigkeit definierter Pressparameter (Presstemperatur: 140 °C bis 200 °C; Presszeitfaktor: 7,5 s/mm bis 12,0 s/mm).

Es bleibt festzuhalten, dass die geringsten Querkzugfestigkeiten bei einer Presstemperatur von 140 °C erreicht werden und eine Erhöhung der Temperatur in höheren Festigkeiten resultiert.

Jedoch muss angemerkt werden, dass die Festigkeitsunterschiede im Temperaturbereich von 160 °C bis 200 °C unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Ergebnisse geringfügig sind. Für die weitere Herstellung der Verbundplatten werden auf Grund dieser Ergebnisse die Presstemperatur auf 180 °C und der Presszeitfaktor zunächst auf 10,5 s/mm festgelegt.

5.2.1.3 Abhängigkeit der Querzugfestigkeit UF-Harz gebundener Popcornverbundplatten vom Presszeitfaktor

Innerhalb dieser Versuchsreihe II.b wird untersucht, inwieweit der Presszeitfaktor die Querzugfestigkeit der Verbundplatten beeinflusst und inwieweit sich der Presszeitfaktor zur vollständigen Aushärtung unterschiedlicher Aminoplasten reduzieren lässt. Zur Herstellung der Verbundplatten kommen die harnstoffformaldehydbasierten Bindemittel Kaurit 350 sowie Kaurit 340 der BASF AG, D-67056 Ludwigshafen zum Einsatz. Die untersuchten Presszeitfaktoren reichen von 4,5 s/mm bis 10,5 s/mm (vgl. Kap. 3.4.1, Tab. 11, Versuchsreihe II.b).

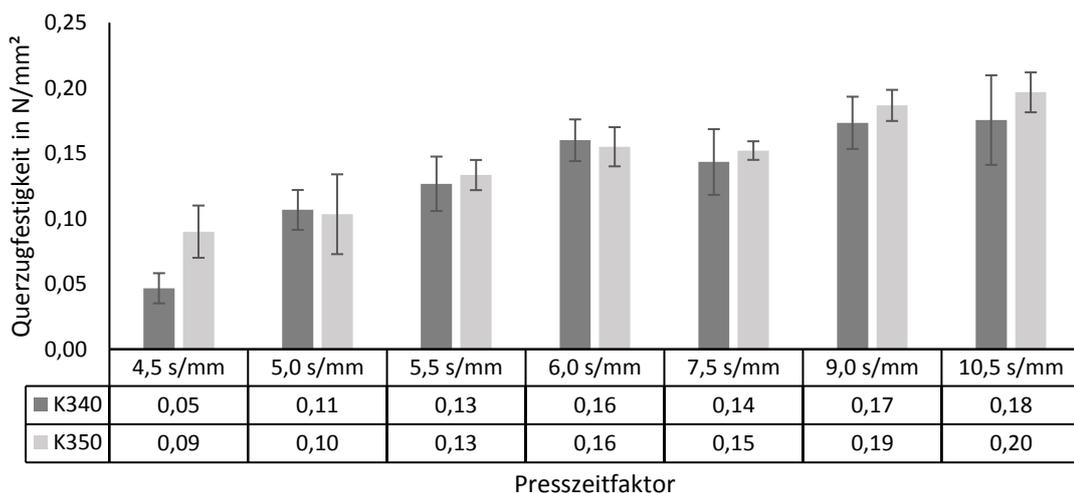


Abbildung 22: Mittlere Querzugfestigkeit der Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m³; Dicke 20 mm) in Abhängigkeit einer untersuchten Presszeitspanne von 4,5 s/mm bis 10,5 s/mm, den verwendeten UF-Harzen K 340 bzw. K 350 sowie einer Presstemperatur von 180 °C.

Abbildung 22 zeigt die mittleren Querzugfestigkeiten der Verbundplatten mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 200 kg/m³ in Abhängigkeit des Bindemittels sowie des Presszeitfaktors. Es lässt sich zunächst für die mit K 340 bzw. K 350 gebundenen Verbundplatten festhalten, dass es mit Verlängerung der Presszeit zu einer Verbesserung der Querzugfestigkeiten kommt. Die höchsten Querzugfestigkeiten von 0,20 N/mm² werden bei einem Presszeitfaktor von 10,5 s/mm für die mit K 350 gebundenen Platten erzielt. Hingegen erreichen die mit K 340 gebundenen Popcornplatten mit 0,18 N/mm² nur 10 % niedrigere Festigkeiten. Des Weiteren geht aus der Untersuchung hervor, dass die beiden verwendeten Bindemittelsysteme bei den

Popcornverbundplatten im ausgehärteten Zustand keine signifikanten Unterschiede zur Folge haben. Die Ergebnisse zeigen, dass neben dem Kaurit Harz 350 auch der formaldehydreduzierte Harz K 340 zum Einsatz kommen kann, ohne hierdurch den Verbund negativ zu beeinflussen. Ein Vergleich der Bindemittel zeigt außerdem, dass mit K 340 gebundene Verbundplatten bei einem Presszeitfaktor von 4,5 s/mm nur sehr niedrigere Querkzugfestigkeiten mit 0,05 N/mm² erreichen. Hingegen werden bei K 350 gebundenen Platten ca. 80 % höhere Festigkeit erzielt. Aus dieser Untersuchung kann festgehalten werden, dass sich das formaldehydärmere Bindemittel nicht negativ auf den inneren Zusammenhalt des Plattenverbundes auswirkt.

5.2.1.4 *Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von UF-Harz gebundenen Popcornverbundplatten von der Rohdichte*

Neben den bereits untersuchten Parametern Bindemittel, Presstemperatur bzw. -zeit stellt auch die Rohdichte eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Werkstoffqualität dar (MAY, 1983). Hierzu wird innerhalb der Versuchsreihe III untersucht, inwieweit sich unterschiedliche Rohdichten unter ansonsten gleichen Herstellungsbedingungen auf die Querkzugfestigkeiten der einzelnen Popcornverbundplatten auswirken. Zu diesem Zweck werden Platten aus Bichsel-Popcorn innerhalb des Rohdichtebereichs 100 kg/m³ bis ca. 350 kg/m³ hergestellt und hinsichtlich der Querkzugfestigkeit geprüft (vgl. Ka. 3.4.1, Tab. 11, Versuchsreihe III). Zunächst lässt sich festhalten, dass allgemein die Festigkeit mit Erhöhung der Rohdichte steigt (vgl. Abb. 23). Auch SCHULTE und FRÜHWALD (1996) geben für geprüfte Spanplatten eine enge Korrelation zwischen Querkzugfestigkeit und Dichte an. Bei Betrachtung der Beziehung zwischen Rohdichte und Querkzugfestigkeit besteht im untersuchten Rohdichtebereich zwischen 100 kg/m³ bis 350 kg/m³ ein annähernd logarithmischer Zusammenhang. Dieser wird nach Anwendung des Rang-Korrelationstest Spearman mit einem Korrelationskoeffizient von 0,91 bestätigt, des Weiteren besagt der Test, dass die Korrelation mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikant ist. Innerhalb der Rohdichte von etwa 100 kg/m³ werden die geringsten Querkzugfestigkeiten mit durchschnittlich 0,10 N/mm² erreicht, die höchsten Querkzugfestigkeiten werden mit etwa 0,30 N/mm² bei einer Rohdichte von ca. 350 kg/m³ erzielt.

Anhand dieser Kennlinie lässt sich ableiten, dass die Rohdichte, wie bei vielen anderen Holzwerkstoffen einen hohen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffes ausübt. Auffällig ist, dass innerhalb des Rohdichtebereiches 100 kg/m³ bis 200 kg/m³ die Querkzugfestigkeit von 0,07 N/mm² auf ca. 0,23 N/mm² um etwa 230 % steigt. Im zweiten Abschnitt der Rohdichteerhöhung von 200 kg/m³ auf ca. 350 kg/m³ nimmt die Anstiegsrate der Querkzugfestigkeit von 0,23 N/mm² auf 0,30 N/mm² deutlich ab und erreicht lediglich 27 %. Der beobachtete nicht lineare Verlauf der Festigkeitssteigerung mit zunehmender Rohdichte kann

eventuell bei hohen Rohdichten auf den notwendigen Komprimierungsdruck zurückgeführt werden. Durch den notwendigen Druck wird die Struktur der Partikel beschädigt und die Festigkeit steigt trotz Rohdichteerhöhung nicht entsprechend an. Ferner ist zu erkennen, dass bei einer Rohdichte von ca. 300 kg/m³ die Querkzugfestigkeit der Popcornverbundplatten den Anforderungen für Spanplatten der DIN EN 312 der Klasse P2 (Möbelbauplatten) von 0,35 N/mm² annähernd entspricht, wobei festzuhalten ist, dass entsprechende Spanplatten der Klasse P2 eine Rohdichte von ca. 650 kg/m³ aufweisen.

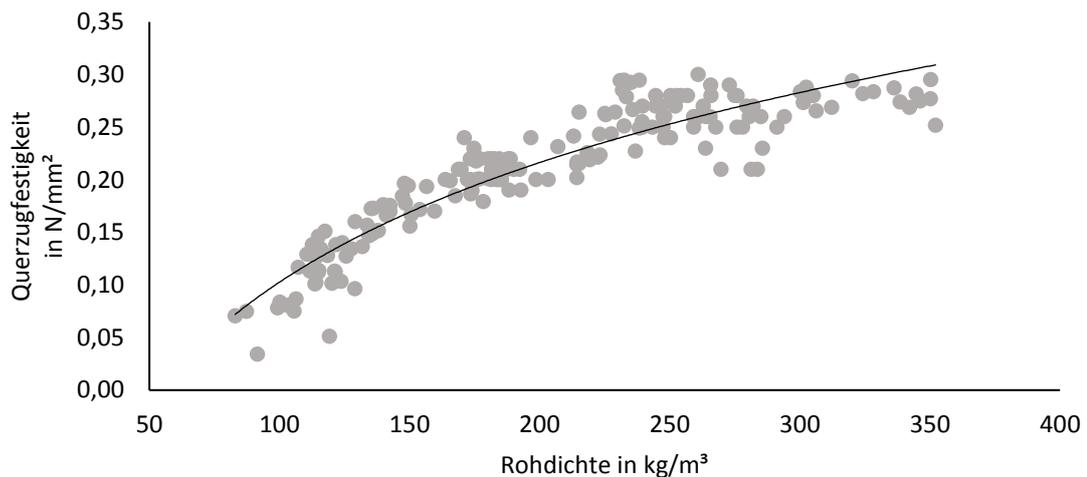


Abbildung 23: Querkzugfestigkeit der Popcornverbundplatten in Abhängigkeit der Rohdichte; Korrelationsanalyse nach Spearman $R^2 = 0,91$. Definierte Pressparameter: Presstemperatur 180 °C und Presszeitfaktor 10,5 s/mm.

5.2.1.5 Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von Popcornverbundplatten vom Bindemittelsystem und Beleimungsgrad

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss des Bindemittelanteils sowie des Bindemittels auf die Eigenschaften der Popcornverbundplatten näher betrachtet. Im Einzelnen wird der Einfluss von zwei UF-Harzen (K 340 sowie K 350) mit unterschiedlichen Beleimungsanteilen (4 %, 6 % und 8 %) auf die Verbundplatten bei Rohdichten von 200 kg/m³ und 300 kg/m³ ermittelt. Zusätzlich wird die Eignung eines formaldehydfreien Bindemittelsystems auf Basis von Methyloldiisocyanat (MDI) zur Herstellung von popcornbasierten Verbundplatten geprüft (vgl. 3.4.1, Tab. 11, Versuchsreihe IV).

Abbildung 24 zeigt, dass die Querkzugfestigkeiten der Verbundplatten – unabhängig vom Bindemittel – bei unterschiedlichen Rohdichten mit abnehmendem Beleimungsgrad sinken. Auffällig ist, dass sich die Festigkeitsunterschiede zwischen den mit unterschiedlichen Beleimungsgraden hergestellten Plattenvarianten bei abnehmender Plattendichte verringern. So liegt der ermittelte signifikante Festigkeitsunterschied zwischen den Plattendichten 200 kg/m³ und 300 kg/m³ bei einer 8 %-igen Beleimung noch bei 32 %, dieser Unterschied wird bei einer

Halbierung der Beleimung auf 4 % Festharz auf atro Popcorn fast vollständig aufgehoben. Aus der Abbildung geht des Weiteren hervor, dass es zwischen den ermittelten Querzugfestigkeiten der Popcornverbundplatten, die mit K 350 bzw. mit K 340 und demselben Bindemittelanteil hergestellt werden, keinen signifikanten Unterschied gibt. Die Prüfergebnisse deuten an, dass die

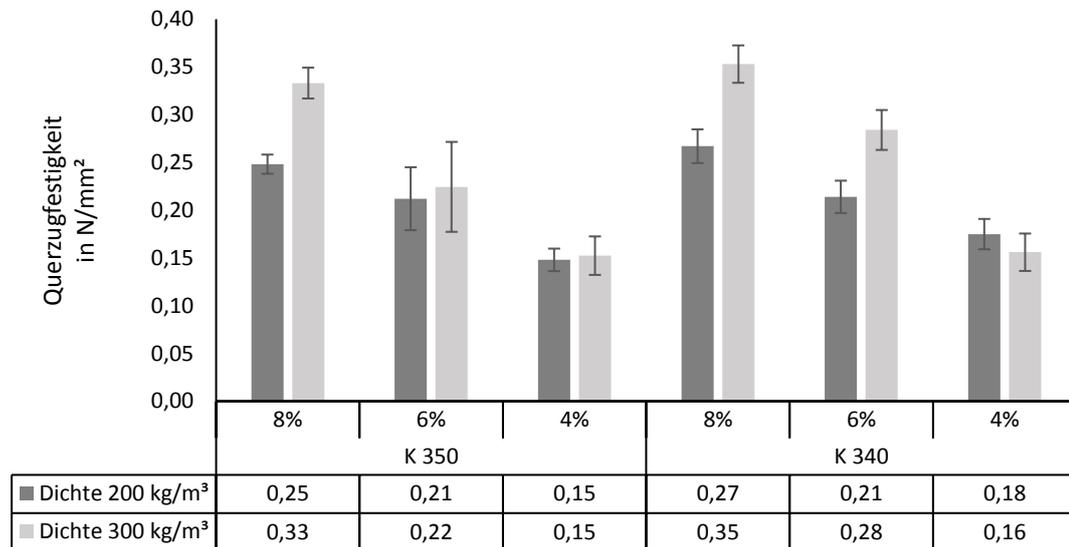


Abbildung 24: Mittlere Querzugfestigkeiten von Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m³ bzw. 300 kg/m³; Dicke 20 mm) unter Verwendung der UF-basierten Bindemittel K 340 sowie K 350 mit Beleimungsanteilen von 4 %, 6 % und 8 % (bez. Festharz auf atro Popcorn).

Herabsetzung des Molverhältnisses von Formaldehyd zu Harnstoff (von 1:1,16 auf 1:1) anscheinend keinen negativen Effekt auf die Querzugfestigkeiten der Popcornverbundplatten ausübt, obwohl in der Literatur vielfach auf eine Reduzierung der Platten- bzw. Bindemittelleigenschaften durch die Herabsetzung des Molverhältnisses hingewiesen wird (PIZZI et al. 1994; DUNKY, 2002). Bei der Reduzierung des Molverhältnisses (F:U) handelt es sich um eine sehr effektive Methode Formaldehydemissionen aus Werkstoffen herabzusetzen (PLATH, 1966). So liegt die Vermutung nahe, dass bei der Prüfung nicht die Klebeverbindung zwischen den Popcornpartikeln der schwächste Punkt im Verbund darstellt, sondern das Popcorngranulat an sich das schwächste Glied ist. D. h. sobald eine bestimmte Zugkraft übertroffen wird, zerreißt das Granulat, ohne an die Festigkeit des Bindemittels heranzukommen. Ähnlich verhält es sich bspw. bei Spanverbundplatten mit Substitutionsgut aus Stärkegranulat oder Rindenpartikeln, hierbei muss sehr genau darauf geachtet werden, dass durch das Substituieren die Festigkeit des Verbundes nicht negativ beeinflusst wird. LINK (2014) berichtet, dass Rindenmaterialien geeignet sind, um Holz innerhalb von Spanplatten zu substituieren, hierbei jedoch die Querzugfestigkeit der Spanplatten in Abhängigkeit des Rindenmaterials – wobei Kiefernrinde einen deutlich stärkeren negativen Effekt auf die Festigkeit ausübt als Fichtenrinde – reduziert wird. In den

Untersuchungen von LINK (2014) zeigt sich, dass ebenfalls die Struktur der einzelnen Rindenpartikel vor den Holzpartikeln bzw. Klebeverbindung versagt, insbesondere der Kiefernrinde.

Neben den UF-Harzen werden innerhalb dieser Versuchsreihe auch MDI basierte Bindemittelsysteme zur Herstellung von Popcornverbundplatten geprüft. Hierzu wird MDI mit Wasser, Lösungsmittel bzw. mit UF-Harz emulgiert und als Bindemittel auf das Material aufgebracht (vgl. Kap. 3.4.1 Tab. 11). Zur Beurteilung der Festigkeitseigenschaften wird ebenfalls die Querkzugfestigkeit herangezogen. Abbildung 25 zeigt, dass MDI gebundene Popcornplatten unabhängig von der Bindemittelmischung (MDI + Wasser, MDI + Lösungsmittel, MDI + UF-Harz) stets unterhalb der Festigkeiten von reinen UF-Harz gebundenen Platten (Bindemittelanteil: Festharz 8 %) liegen. Auffällig ist, dass innerhalb der Variante MDI + Lösungsmittel nur sehr geringe Festigkeitswerte erreicht werden. Hier werden lediglich Werte von ca. 0,16 N/mm² bei einer durchschnittlichen Rohdichte von 250 kg/m³ erzielt. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Verwendung des Lösungsmittels Propylencarbonat, hierdurch wird die Oberfläche des Popcornmaterials angegriffen und beschädigt. Es kann beobachtet werden, dass das Material nach der Beleimungsphase keine feste und intakte Oberfläche mehr aufweist. Der Einsatz des Lösungsmittels wirkt sich somit negativ auf die Festigkeit der Verbundplatten aus.

Des Weiteren ergeben die Untersuchungen, dass zwischen den Varianten MDI + Wasser und MDI + UF-Harz keine signifikanten Unterschiede vorliegen, wobei die mit MDI + UF-Harz gebundenen Verbundplatten nur geringfügig höhere Querkzugfestigkeiten erzielen. So hat eine Zugabe von 2 % bzw. 4 % UF-Harz in die MDI-Lösungen eine leichte positive Veränderung hinsichtlich der Querkzugfestigkeit zur Folge.

Insgesamt lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass ein auf MDI basierendes Bindemittel im Vergleich zu UF-Harz zu keinen verbesserten Querkzugfestigkeiten der damit hergestellten Verbundplatten aus Popcorngranulat führt und somit weniger zur Herstellung geeignet ist. Auch fehlt dem MDI die nötige Kaltklebrigkeit, die den Herstellungsprozess wie im Fall von UF-Harzen stark vereinfacht.

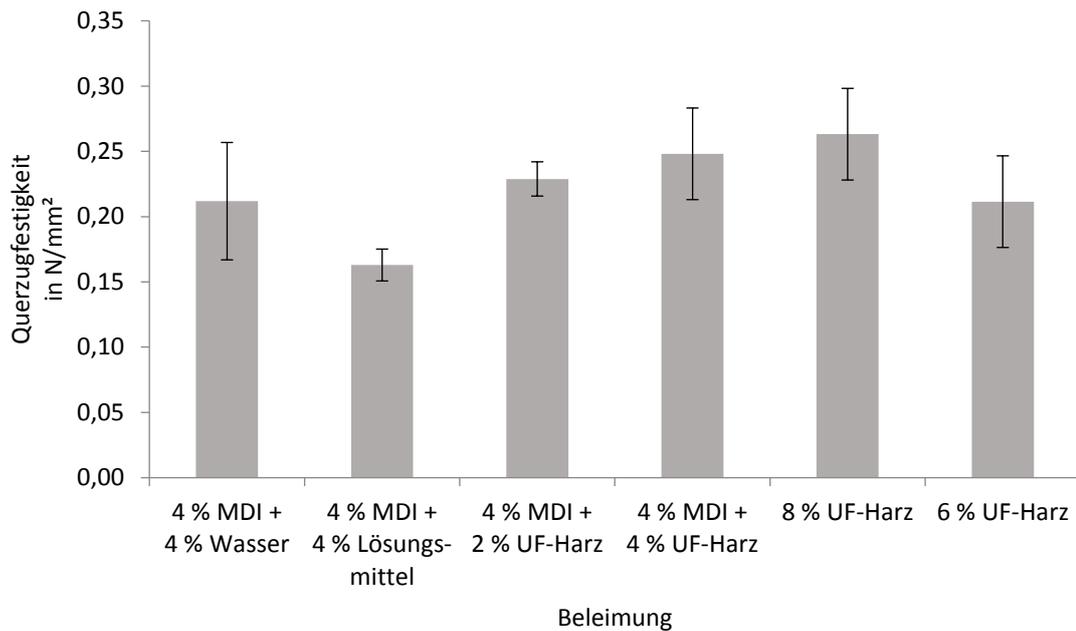


Abbildung 25: Mittlere Querzugfestigkeit der mit MDI gebundenen Verbundplatten (Rohdichte 250 kg/m³; Dicke 20 mm) sowie UF-Harz gebundene Referenzverbundplatten mit Bindemittelanteilen von 8 % bzw. 6 % (Festharz bez. auf atro Popcorn).

5.2.1.6 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Querzugfestigkeit

Die Untersuchungen zur Querzugfestigkeit machen deutlich, dass die Eigenschaften der Popcornverbundplatten von verschiedenen Faktoren abhängig sind und durch Variierung stark beeinflusst werden können. Die Untersuchungen zeigen, dass

- die popcornbasierten Verbundplatten, dessen Popcorn nach dem Bichsel-System aufgeschlossen ist, die besten Eigenschaften hinsichtlich der Querzugfestigkeit aufweisen. Die geringste Festigkeit des Plattenverbundes ist im mittleren Bereich der Platte zu finden. Ähnlich wie bei Spanplatten und anderen Verbundwerkstoffen kann die reduzierte Rohdichte und die niedrige Temperatureinwirkung im Inneren der Verbundplatten als Ursache angenommen werden (DEPPE und ERNST, 2000). Ferner besitzt das verwendete Bichsel-Popcorn gute Beleimungs- sowie Streueigenschaften.
- die Pressbedingungen sowie die Herstellung der Verbundplatten mit dem Herstellungsverfahren der Spanplatten vergleichbar sind,
- sich herkömmliche Harnstoff-Formaldehyd-Harze zur Herstellung der Verbundplatten eignen,
- eine ausgeprägte Korrelation zwischen der Querzugfestigkeit und der Rohdichte der untersuchten Verbundplatten existiert. Verbundplatten mit einer durchschnittlichen Rohdichte von 300 kg/m³ erreichen etwa 0,30 N/mm². Auffällig ist, dass ab einer Rohdichte

von 250 kg/m^3 vermehrt Brüche innerhalb der einzelnen Popcornpartikel beobachtet werden. Anhand der Beobachtungen kann vermutet werden, dass die innere Festigkeit der Popcornpartikel bereits ab einer Rohdichte von etwa 250 kg/m^3 mit $0,25 \text{ N/mm}^2$ bis $0,30 \text{ N/mm}^2$ überstiegen wird.

- die Verwendung der zwei UF-Harze K 350 und K 340 zu keinen signifikanten Unterschieden hinsichtlich der Querkzugfestigkeit führt. Hieraus folgt, dass eine Herabsetzung des Molverhältnisses F : U die Festigkeit der Verbunde nicht negativ beeinflusst. Ferner zeigen die Untersuchungen, dass mit abnehmendem Bindemittelanteil (8 %, 6 % sowie 4 %) die Querkzugfestigkeiten sinken. Hierbei erreichen Popcornverbundplatten mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 und einem Beleimungsgrad (K 350) von 8 % bzw. 4 % Querkzugfestigkeiten von $0,33 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,15 \text{ N/mm}^2$.

5.2.2 Werkstoffprüfung der popcornbasierten Sandwichverbundplatten

5.2.2.1 Bestimmung der Biegeeigenschaften

Das folgende Kapitel zeigt die ermittelten Ergebnisse der Biegefestigkeit der Sandwichverbundplatten, hergestellt jeweils nach dem Einschritt- bzw. nach dem Zweischritt-Verfahren (vgl. Kap. 3.4.2). Hierbei sollen die Eigenschaften der entwickelten Platten beschrieben und eingeordnet werden. Da bisher keine gültige Norm für Sandwichverbundplatten erarbeitet ist, werden alle Werkstoffe in Anlehnung an DIN EN 310 für Spanplatten im 3-Punkt-Biegeversuch sowie ausgewählte Sandwichplatten nach DIN 53 293 im 4-Punkt-Biegeversuch für Kernverbundplatten geprüft und evaluiert.

5.2.2.1.1 Einschritt-Verfahren zur Herstellung von popcornbasierten Sandwichverbundplatten

Innerhalb dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Herstellungsverfahren zur Fertigung der Sandwichplatten verfolgt. Zum einen wird ein einschrittiges Herstellungsverfahren (Versuchsreihe V bis VII) und zum anderen ein zweischrittiges Verfahren (Versuchsreihe VIII und IX) angewendet. Innerhalb des Einschritt-Verfahrens werden die Materialien Holzspäne und Popcornmaterial bzw. Holzfasern und Popcorn nacheinander gestreut und anschließend zu einer Platte verpresst. Im ersten Versuchsabschnitt zur Evaluierung des Einschritt-Verfahrens wird geprüft, ob sich die Materialien Holzfasern und Holzspäne zur Streuung einer Deckschicht eignen und damit zufriedenstellende Festigkeiten erzielt werden können. In einem weiteren Schritt werden Sandwichplatten mit verschiedenen Bindemittelsystemen hergestellt und beurteilt. Abschließend wird die Auswirkung von unterschiedlich hohen Deckschichtanteilen und

Plattendicken auf das Tragverhalten der Platten aufgezeigt (vgl. Kap. 3.4.2, Versuchsreihe V bis VII).

Versuchsreihe V: Herstellung von Sandwichplatten im Einschnitt-Verfahren mittels unterschiedlicher Deckschichtmaterialien

Abbildung 26 bildet die Ergebnisse der auf Biegung geprüften Sandwichplatten mit Deckschichten aus Spänen bzw. Fasern ab, wobei die Deckschichten einen Anteil von 40 % und der Popcornverbund einen Anteil von 60 % an der Gesamtplatte ausmachen. Das Bruchmoment wird in Abhängigkeit der Rohdichte der Sandwichverbundplatten (300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 sowie 450 kg/m^3) dargestellt und den Ergebnissen von auf Biegung geprüften Spanplatten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Sandwichplatten mit einer Beplankung aus Fasermaterial, unabhängig der Rohdichte, ein höheres Bruchmoment aufweisen als die Sandwichplatten mit Deckschichten aus Holzspänen.

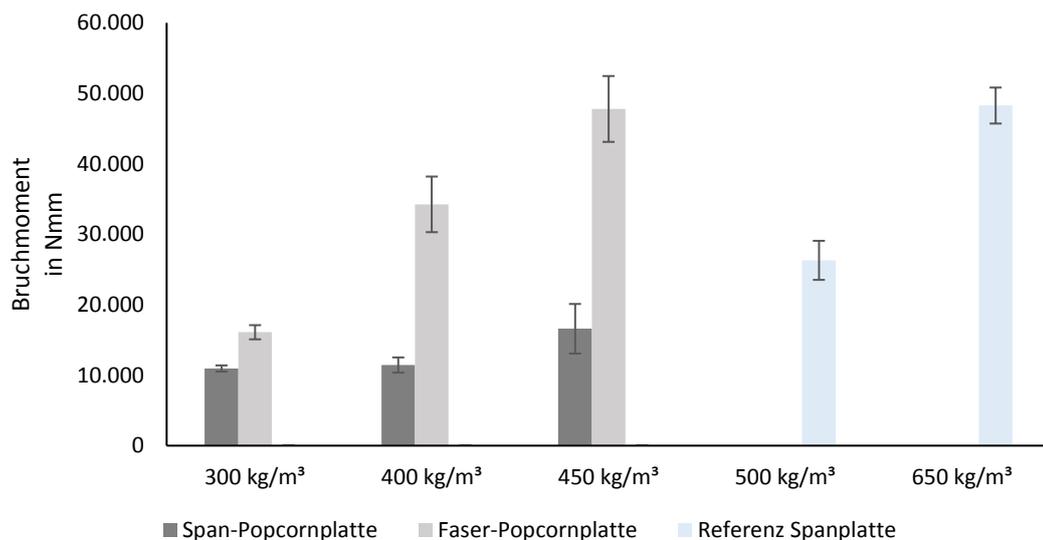


Abbildung 26: Bruchmomente der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , 450 kg/m^3 ; Plattendicke 20 mm). Die Sandwichverbunde bestehen aus einem Popcornverbund (60 Gew.-%) sowie Deckschichten (40 Gew.-%) aus Holzspänen bzw. Holzfasern. Verwendetes Bindemittelsystem: K 350. Zum Vergleich Bruchmomente von Referenzspanplatten mit den Rohdichten 500 kg/m^3 sowie 650 kg/m^3 .

Auffällig ist, dass mit einer Rohdichteerhöhung des Sandwichverbundes von 300 kg/m^3 auf 400 kg/m^3 bzw. auf 450 kg/m^3 eine deutliche Verbesserung der Tragfähigkeit des Faser-Popcorn-Verbundes bewirkt werden kann. Der Einsatz von Fasermaterial zur Ausformung der Deckschichten hat ein Bruchmoment von etwa 34.000 Nmm bzw. 47.700 Nmm zur Folge. Mit Bezug auf die Sandwichplatten mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 kann so mit einer

Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % eine signifikante Steigerung des Bruchmoments um den Faktor 2,1 bzw. 3,0 erzielt werden. Dagegen zeigen die Sandwichplatten mit Deckschichten aus Spanmaterial keine oder nur geringfügige Steigerungen hinsichtlich der Tragfähigkeit mit Veränderung der Rohdichte. Hier bewirkt eine Rohdichtesteigerung keine signifikante Verbesserung der Festigkeiten. Die Ergebnisse der Faser-Sandwichplatten mit Rohdichten von 400 kg/m^3 bzw. 450 kg/m^3 zeigen, dass nach der 3-Punkt-Biegeprüfung die entwickelten Sandwichplatten ein ähnliches Tragverhalten aufweisen wie die Referenzspanplatten mit einer Rohdichte von 650 kg/m^3 und diese sogar noch übertreffen. Das unterschiedliche Verhalten der Sandwichplatten hinsichtlich einer Rohdichtesteigerung deutet daraufhin, dass die Ursache im ausgewählten Deckschichtmaterial liegt. Die Sandwichplatten mit Deckschichten aus Faser- bzw. Spanmaterial zeigen bereits während der Herstellung deutliche Unterschiede. So kann unter Verwendung von Fasermaterial, bedingt durch deren geringere Schüttdichte, ein wesentlich höherer „Presskuchen“ realisiert werden als mit Spanmaterial. Hierdurch ist eine stärkere Komprimierung des Presskuchens und folglich eine bessere Ausprägung der Deckschichten für die Sandwichplatten mit Faseranteil möglich. Der erhöhte Presskuchen wirkt sich auch direkt auf das Rohdichteprofil der Sandwichplatten aus. Aus der Untersuchung der entsprechenden Rohdichteprofile geht hervor, dass die Prüfkörper der Sandwichplatten mit Faseranteil ein ausgeprägtes Rohdichteprofil aufweisen, das mit herkömmlichen Spanplatten vergleichbar ist. Hierbei handelt es sich um ein deutliches U-Profil, das einen Rohdichteabfall von der Deckschicht mit etwa 790 kg/m^3 zur Mittelschicht mit 257 kg/m^3 zeigt (vgl. Kap. 10.2, Abb. 41 und 42). Dagegen sind bei den Sandwichplatten mit Spananteil die Rohdichtemaxima der Deckschichten um etwa 15 % niedriger, hierbei beträgt die mittlere Deckschichtrohddichte ca. 670 kg/m^3 . Insgesamt entsprechen die ermittelten Profile den typischen Rohdichteprofilen nach NIEMZ und WAGENFÜHR (2008). Die niedrige Deckschichtrohddichte der Sandwichplatten mit Spananteil kann mit den mangelnden Biegefestigkeiten direkt in Verbindung gebracht werden. Nach NIEMZ (2002) wirkt sich der Verdichtungsgrad der Deckschichten direkt auf die Biegefestigkeit von Spanplatten aus. Des Weiteren geben DEPPE und ERNST (2000) an, dass sich die Rohdichte eines Werkstoffes allgemein auf die Eigenschaften und insbesondere die Deckschichtrohddichte auf die Biegefestigkeit eines Holzwerkstoffes auswirkt. Dasselbe gilt für Sandwichplatten mit einem schwachen Kern, hierbei werden die Biegeeigenschaften des Verbundes durch die Steifigkeit und somit zum großen Teil durch die Rohdichte der Deckschichten beeinflusst, da die Deckschichten die durch Biegung entstehenden Spannungen aufnehmen. Jedoch wird bei einer Sandwichplatte das maximale Bruchmoment durch den schwächsten Punkt der Platte – den Kern – bestimmt (MAHFUZ et al., 2004; FATHI et al., 2013). Die direkte Gegenüberstellung der Span- mit den Faser-Sandwichplatten lässt den Schluss zu, dass der Einsatz von Spanmaterial zur Ausbildung von

dünnen und steifen Deckschichten sich im Falle einer leichten Sandwichplatte im Einschritt-Verfahren nicht eignet. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen auf die Verwendung von Spanmaterial verzichtet.

Versuchsreihe VI: Einfluss unterschiedlicher Bindemittelsysteme auf die Biegeeigenschaften von im Einschritt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten

Aus den Abbildungen 27 und 28 wird ersichtlich, welchen Einfluss unterschiedliche Bindemittelsysteme – u. a. die formaldehydbasierten Bindemittel Kaurit 340 bzw. Kaurit 350 sowie Kombinationen der beiden UF-Harze mit PMDI (vgl. Kap. 3.4.2, Tab. 14) – auf die Festigkeitseigenschaften der Faser-Sandwichplatten (40 Gew.-% Fasern in Deckschichten) ausüben. Neben dem Einfluss des Bindemittelsystems wird auch geprüft, ob sich die Plattendicke sowie die Rohdichte des Verbundes auf die Festigkeitseigenschaften auswirken. Die Ergebnisse zeigen, dass die Eigenschaften des Verbundes durch die Wahl des Bindemittelsystems, der Rohdichte sowie der Plattendicke beeinflussbar sind. Demnach weisen Sandwichplatten, deren Popcornverbunde sowie Deckschichten nur mit dem UF-Harz Kaurit 350 ausgehärtet sind höhere Festigkeiten auf als die ausschließlich mit Kaurit 340 gebundenen Verbundplatten (vgl. Abb. 27). Die ermittelten Daten zu diesen Varianten sind zwar normalverteilt und zusätzlich liegt Varianzhomogenität vor, jedoch gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten, wie aus der statistischen Analyse hervorgeht. Des Weiteren kann Abbildung 28 entnommen werden, dass die Sandwichplatten, die mit kombinierten Bindemittelsystemen aus UF-Harz und PMDI verleimt sind – wobei der Popcornverbund mit UF-Harz und die Deckschichten mit PMDI gebunden sind – ähnliche Biegefestigkeiten aufweisen wie die Sandwichplatten mit der entsprechenden Einzelbeimung aus Kaurit 340 bzw. 350 (vgl. Abb. 27). Es zeigt sich, dass die Eigenschaften der mit K 340 und PMDI gebundenen Sandwichplatten immer unterhalb der erzielten Festigkeiten der Sandwichplatten mit K 350 und PMDI liegen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht signifikant sind. Entsprechend der aufgezeigten Ergebnisse kann ein Zusammenhang zwischen den Molverhältnissen der Bindemittel und den Platteneigenschaften abgeleitet werden. Das harnstoffformaldehydbasierte Bindemittel Kaurit 340 zeichnet sich im Vergleich zu Kaurit 350 durch ein herabgesetztes Molverhältnis von Formaldehyd zu Harnstoff (F : U) aus. Die Verringerung des Molverhältnisses bewirkt zwar einerseits eine Reduzierung der Formaldehydemissionen aus den UF-Harz gebundenen Verbundwerkstoffen (vgl. Kap. 5.1.7), doch andererseits werden auch im gleichen Zuge die Platteneigenschaften wie bspw. Biegefestigkeiten und Quelleigenschaften negativ beeinflusst (DEPPE und ERNST, 2000; MEYER, 1979).

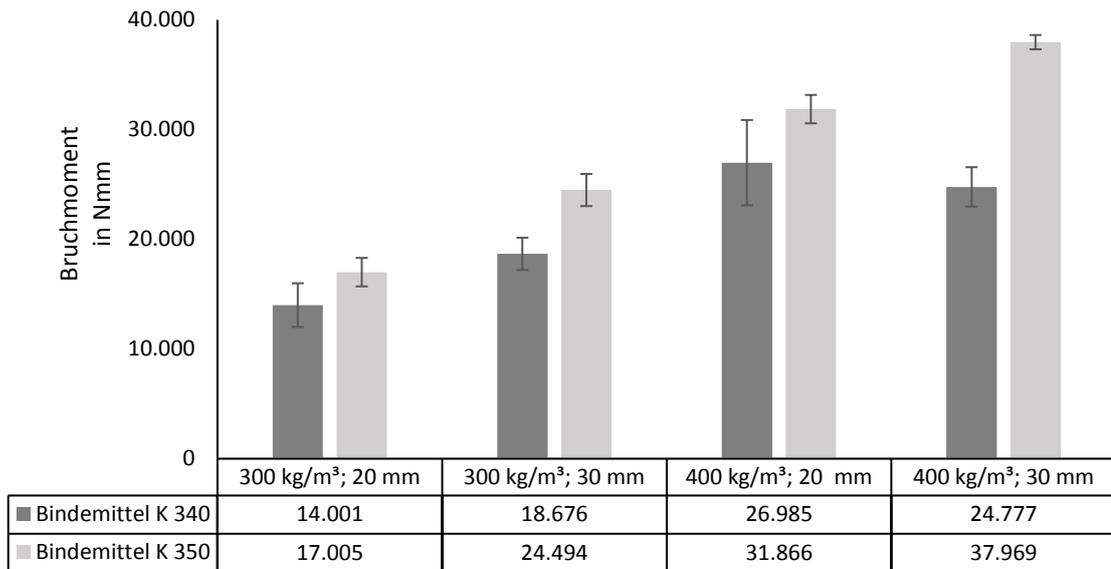


Abbildung 27: Bruchmomente der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m³ bzw. 400 kg/m³; Plattendicke 20 mm bzw. 30 mm). Sandwichverbunde bestehen aus einem Popcornverbund (60 Gew.-%) sowie Deckschichten (40 Gew.-%) aus Holzfasern; verwendete Bindemittelsysteme: K 340 bzw. K 350.

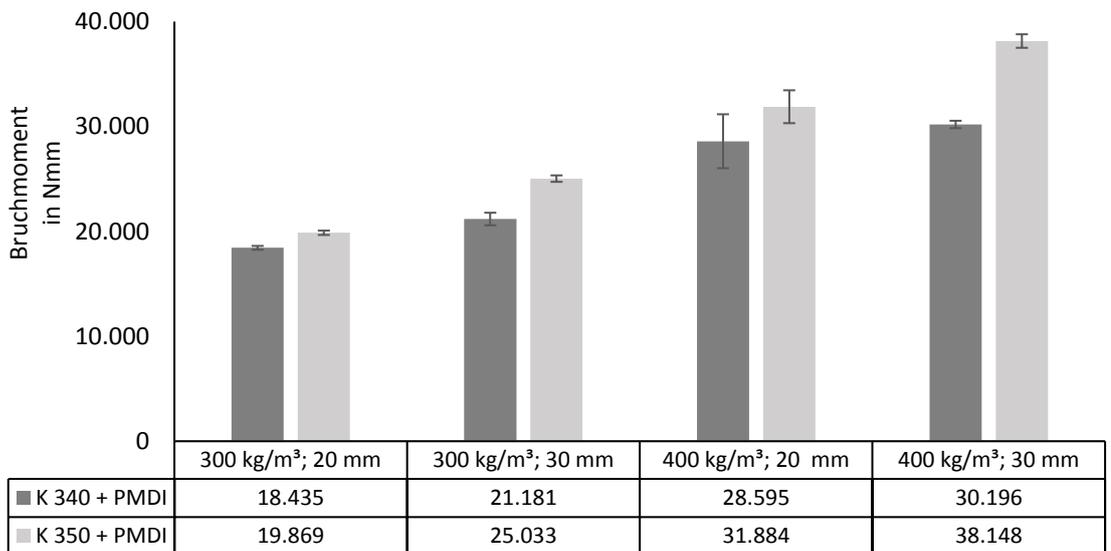


Abbildung 28: Bruchmomente der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m³ bzw. 400 kg/m³; Plattendicke 20 mm bzw. 30 mm). Sandwichverbunde bestehen aus einem Popcornverbund (60 Gew.-%) sowie Deckschichten (40 Gew.-%) aus Holzfasern; verwendete Bindemittelsysteme K 340 + PMDI bzw. K 350 + PMDI.

Auffällig ist, dass die beiden verwendeten UF-Harze hinsichtlich der Biegefestigkeit tendenziell zu unterschiedlichen Festigkeiten führen. Jedoch konnte ein solcher Einfluss der Bindemittel auf die Querkzugfestigkeiten der Popcornverbundplatte in vorherigen Untersuchungen nicht festgestellt werden (vgl. Kap. 5.2.1.5, Versuchsreihe IV). Die Reduzierung des Molverhältnisses führt dazu,

dass die Vernetzung zwischen Formaldehyd und Harnstoff ebenfalls reduziert wird und schließlich in schlechtere Festigkeiten resultiert.

Aus den Ergebnissen geht ebenfalls hervor, dass die Rohdichte einen Einfluss auf die Verbundplatteneigenschaften ausübt (vgl. Abb. 27 und 28). So steigt das Tragverhalten der Sandwichplatten unabhängig vom Bindemittel bei gleichbleibender Plattendicke und nur veränderter Plattenrohichte an. Die mit K 350 gebundenen 20 mm dicken Sandwichplatten können mit einem Bruchmoment von knapp 17.000 Nmm bei einer anvisierten Rohdichte von 300 kg/m^3 belastet werden. Eine Rohdichtesteigerung auf 400 kg/m^3 bewirkt eine Verbesserung des Tragverhaltens um ca. 87 % auf etwa 31.800 Nmm. Durch den Einsatz von K 340 erreichen 20 mm dicke Sandwichplatten mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 ein Bruchmoment von ca. 26.900 Nmm. So zeigen die Verbundplatten eine etwa 15 % niedrigere Festigkeit als die mit K 350 gebundenen Platten. Neben den Rohdichten kann auch ein Einfluss der Plattendicke auf die Eigenschaften der Sandwichplatten beobachtet werden. So zeigen die Abbildungen 27 und 28, dass unabhängig von Bindemittel und Rohdichte bei Steigerung der Plattendicke ebenfalls ein Anstieg der Tragfähigkeit registriert werden kann. Aus den Ergebnissen wird ein Zusammenhang zwischen Festigkeit und Plattendicke deutlich, d. h. dass das Bruchmoment einer Sandwichplatte bereits durch Erhöhung der Plattendicke verbessert werden kann. Im Falle der Faser-Sandwichplatten heißt das, dass die Bruchmomente der Sandwichplatten – unabhängig vom Bindemittel – mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 durch eine Erhöhung der Plattendicke um 10 mm um etwa 33 % bis 44 % verbessert werden können. Das beobachtete Verhalten der Sandwichplatten unter Biegebelastung stimmt mit Angaben aus der Literatur überein. Demnach wird nach Schneider (1986) das Tragverhalten eines Plattenverbundes durch den Elastizitätsmodul und den Widerstandsmoment einer Platte beeinflusst. Da das Widerstandsmoment für einen Sandwichquerschnitt einer Platte wie in Gleichung 12 definiert ist,

$$\text{Widerstandsmoment in mm}^3: W \approx 2 * b * t * d_1 \quad (12)$$

(Herleitung der Formel siehe Kap. 10.1)

wirkt sich eine Erhöhung der Plattendicke positiv auf das Tragverhalten einer Sandwichplatte aus. Die positive Wirkung der Erhöhung der Plattendicke auf die Biegeeigenschaften ist jedoch im Falle der popcornbasierten Sandwichplatten nicht unbegrenzt. Durch eine Erhöhung der Plattendicke wird auch die Rohdichteverteilung im Plattenquerschnitt erheblich beeinflusst. Hierdurch wird im Allgemeinen die Dichte in der Mittelschicht von Werkstoffen deutlich herabgesetzt. Die reduzierte Dichte im Platteninneren hat zur Folge, dass der Zusammenhalt des Verbundes beeinträchtigt und herabgesetzt wird und folglich bei einer Biegebelastung die resultierenden

Spannungen nicht aufnehmen kann. Hieraus kann abgeleitet werden, dass eine zu groß gewählte Plattendicke zu einer drastischen Herabsetzung der Platteneigenschaften, trotz steigendem Widerstandsmoment, führt. Während der Biegeprüfung versagten sämtliche Prüfkörper als normale Biegebrüche, d. h. durch die Belastung ist es durch einwirkende Zug- und Druckkräfte zuerst zum Bruch bzw. Riss in der unteren Deckschicht und anschließend zum Bruch in der ganzen Platte gekommen. Hieraus kann abgeleitet werden, dass bei den hier entwickelten Sandwichplatten (im Einschnittverfahren) mit Deckschichten aus Fasermaterial den Schwachpunkt der Platten immer die Deckschichten darstellen. Um eine Verbesserung der Biegeeigenschaften zu erzielen, werden daher in der folgenden Versuchsreihe VII die Deckschichten aus Holzfasern von 40 Gew.-% auf 50 Gew.-% bzw. 60 Gew.-% verstärkt.

Versuchsreihe VII.a: Einfluss der Deckschichtdicken auf die nach der 3-Punkt-Biegeprüfung ermittelten Biegeeigenschaften der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten

Aus der Abbildung 29 gehen die Ergebnisse für Sandwichplatten mit anvisierten Rohdichten von 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3 und Faserdeckschichten mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen hervor. Obwohl ein direkter Vergleich der popcornbasierten Sandwichplatten mit herkömmlichen für den Möbelmarkt verwendeten Spanplatten nur bedingt möglich, zulässig und sinnvoll ist, werden zu Vergleichszwecken die Bruchmomente von Referenzspanplatten mit Rohdichten von 500 kg/m^3 und 650 kg/m^3 mittels der 3-Punkt-Biegeprüfung ermittelt und ebenfalls in Abbildung 29 dargestellt. Dies liegt zum einen an dem grundsätzlich voneinander differenten Plattenaufbau aus den verschiedenen Materialien mit ebenso unterschiedlichen Eigenschaften und zum anderen an den wesentlich niedrigeren Rohdichten. Allgemein gilt, dass nach DIN EN 312 Spanplatten der Klasse P 2 für Inneneinrichtungen im Trockenbereich einer Biegespannung von 11 N/mm^2 genügen sollten. In Anlehnung an die Norm ist eine Spanplatte im Bereich dieses Grenzwertes mit einem Bruchmoment von ca. 33.000 Nmm belastbar. Ein Vergleich mit den bisher realisierten Ergebnissen der Sandwichplatten im Einschnitt-Verfahren zeigt, dass die Bruchmomente der Sandwichplatten in den meisten Variationen (Kombinationen aus Bindemittel, Rohdichte sowie Plattendicke) unterhalb dieses Grenzwertes liegen, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Rohdichten der Sandwichplatten deutlich unterhalb der durchschnittlichen Rohdichte einer Spanplatte des Typs P 2 liegen. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass mit Anstieg der Fasermenge in den Deckschichten die Biegeeigenschaften der Sandwichplatten verbessert werden (vgl. Abb. 29). Durch die Verwendung von 50 Gew.-% Fasern in den Deckschichten werden Bruchmomente von knapp 34.000 Nmm bzw. 37.000 Nmm bei Rohdichten von 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3 erzielt. Eine weitere Verstärkung der Deckschichten

auf 60 Gew.-% bewirkt eine – nach statistischer Auswertung – leicht signifikante Verbesserung der Biegeeigenschaften, sodass die Sandwichplatten mit einem Bruchmoment von 39.400 Nmm bzw. 43.600 Nmm innerhalb der Rohdichten 300 kg/m^3 sowie 400 kg/m^3 belastet werden können. Innerhalb dieser Plattenvariante sind vermehrt Schubbrüche während der Biegebelastung aufgetreten. Hieraus kann geschlossen werden, dass die Erhöhung der Fasermenge innerhalb der Deckschichten von 40 Gew.-% auf insgesamt 60 Gew.-% zu einer Verbesserung der Biegeeigenschaften geführt hat, eine weitere Erhöhung des Faseranteils auf $> 60 \%$ würde jedoch keine Verbesserung der Biegeeigenschaften mehr zur Folge haben. Ab hier kann der Kern der Verbundplatte den Belastungen nicht mehr standhalten und stellt den Schwachpunkt des Verbundes dar. Aus der statistischen Analyse geht hervor, dass im Allgemeinen die beobachteten Unterschiede, innerhalb einer Variante bedingt durch die beiden Rohdichten 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3 , sich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht signifikant voneinander unterscheiden. Eine Ausnahme bilden die Sandwichplatten mit einem 60 %igen Deckschichtanteil, da hier die unterschiedlichen Rohdichten statistisch signifikante Unterschiede bewirken.

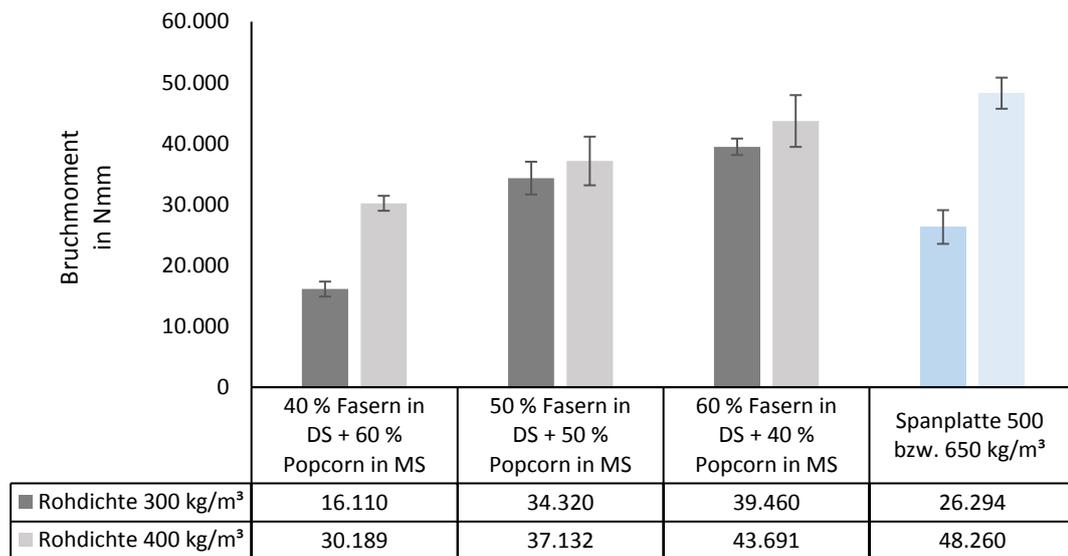


Abbildung 29: Bruchmomente der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) mit variierenden Deckschicht- und Mittelschichtanteilen (40 %, 50 % sowie 60 % Deckschichtanteile); Vergleich mit Referenzspanplatten (Rohdichte 500 kg/m^3 (dunkelblau) bzw. 650 kg/m^3 (hellblau)).

Zusammenfassend geht aus diesen Untersuchungen (Versuchsreihe V bis VII) hervor, dass

- UF-Harze sich zur Verleimung von Popcorn und Fasermaterial eignen und ein Einsatz von PMDI keine Verbesserungen der Festigkeiten von Sandwichplatten bewirkt,
- Faser-Sandwichplatten (Deckschichtanteil 40 %) bereits mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 und Plattendicken von 20 mm bzw. 30 mm Bruchmomente aufweisen, die dem Tragverhalten von Spanplatten entsprechen,
- Sandwichplatten mit einem Deckschichtanteil von $\geq 50 \%$ Faseranteil und einer Rohdichte von ca. 300 kg/m^3 mit einem Bruchmoment ähnlich dem einer Spanplatte belastet werden können.

Versuchsreihe VII.b: Einfluss der Deckschichtdicken auf die nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung ermittelten Biegeeigenschaften der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten

Die bisherigen Analysen beziehen sich alle auf Ergebnisse, die mit Hilfe der 3-Punkt-Biegeprüfung ermittelt werden, obwohl in Kapitel 3.3.4 auf die mangelnde Eignung dieser Prüfungsform für Sandwichplatten hingewiesen wird. Diese Methode wird – trotz der gerechtfertigten Einwände – angewendet, um so die Eigenschaften der Sandwichplatten erstmals einzuordnen. Anschließend werden die Sandwichplatten, die die vielversprechendsten Eigenschaften aufweisen und konkurrenzfähig hinsichtlich des Tragverhaltens von Spanplatten erscheinen, zusätzlich mit Hilfe der 4-Punkt-Biegeprüfung evaluiert. Die zusätzliche Untersuchung ermöglicht eine genauere Beurteilung des Einflusses der Schub- bzw. Biegeverformung auf die Biegeeigenschaften der leichten Sandwichplatten. Die folgende Abbildung 30 sowie die Tabelle 23 zeigen eine Gegenüberstellung der Bruchmomente ermittelt nach DIN EN 310 und DIN 53 293 von Faser-Sandwichplatten (Rohdichte 300 kg/m^3 bzw. 400 kg/m^3) sowie Referenzspanplatten mit einer Rohdichte von 650 kg/m^3 .

Auffällig an der Gegenüberstellung ist, dass die Bruchmomente in den einzelnen Varianten der Sandwichplatten nicht übereinstimmen, obwohl ein Bruchmoment vom belasteten statischen System unabhängig sein sollte (vgl. Kap. 10.1 Herleitung der Bruchmomente). D. h ein Werkstoff, der nach Norm einer bestimmten Prüfungsmethode bspw. der 3-Punkt-Biegeprüfung getestet wird, müsste bei korrekter Anwendung einer anderen Prüfmethode, z. B. der 4-Punkt-Biegeprüfung dieselben Festigkeitswerte erzielen. Dieser Aspekt trifft jedoch bei den Bruchmomenten der Sandwichplatten nicht zu, lediglich im Falle der geprüften Spanplatten werden unabhängig vom Belastungssystem jedes Mal dieselben Bruchmomente ermittelt (vgl. Abb. 30). Hieraus kann abgeleitet werden, dass es durch Anwendung der 3-Punkt-Biegeprüfung

zu einer systematischen Überschätzung der Bruchmomente und hiermit einhergehend der Biegeeigenschaften der leichten Sandwichverbundplatten kommt.

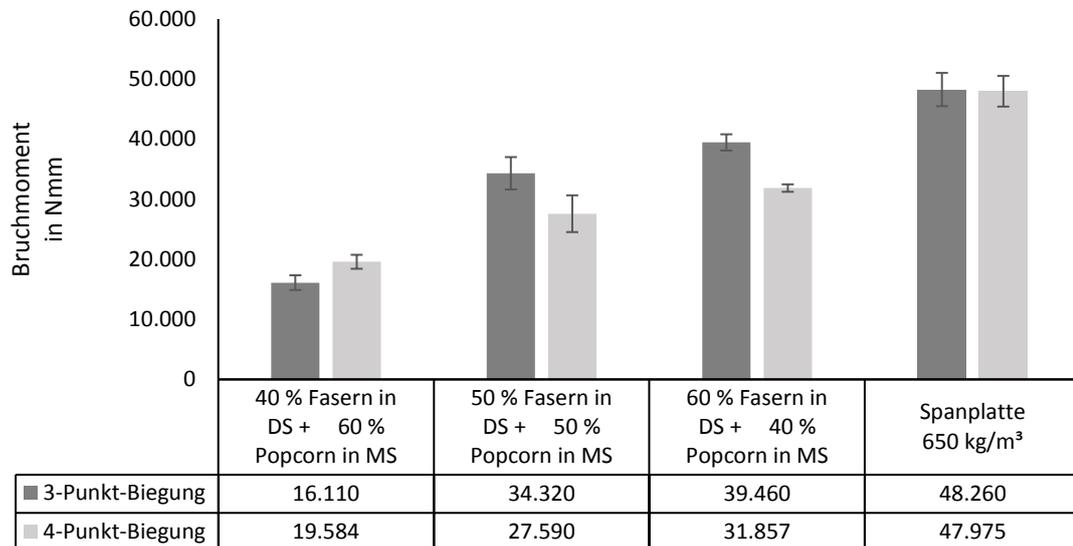


Abbildung 30: Bruchmomente ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung an Faser-Sandwichplatten (300 kg/m³; Dicke 20 mm) sowie zu Vergleichszwecken an Referenzspanplatten (650 kg/m³; Dicke 19 mm).

Die Überschätzung der Belastbarkeit der Verbundplatten variiert zwischen 17 % und ca. 35 %. Hierbei stellt sich die Frage, weshalb für die nach der 3-Punkt-Biegeprüfung untersuchten Werkstoffe bessere Festigkeiten ermittelt werden, als wenn diese mit der 4-Punkt-Biegeprüfung belastet werden. Ein Anhaltspunkt ist, dass die Sandwichplatten sehr empfindlich gegenüber Schubspannungen reagieren und diese Spannungen fallen auf Grund des statischen Systems bei einer 4-Punkt-Biegung deutlich größer aus als bei einer 3-Punkt-Biegung (CASARI et al., 2005). Erst durch die Anwendung der 4-Punkt-Biegeprüfung wird die Empfindlichkeit der Sandwichplatten gegenüber Schubverformung deutlich. Die Verteilung des einwirkenden Kraftmaximums (F_{max}) auf zwei Krafteinleitungspunkte ($F_{max}/2$) bewirkt, dass die Werkstoffe einer deutlich höheren Kraft standhalten können, gleichzeitig aber auch verstärkt Querkräfte (Q) im Inneren der Platte wirken. Die entstehenden Querkräfte sind bei einer 4-Punkt-Biegung deutlich größer als bei einer 3-Punkt-Biegung und verursachen Schubspannungen, die einen Schubbruch im Inneren des Plattenverbundes auslösen (SCHNEIDER, 1986). Denn für die Schubspannung gilt die folgende Gleichung 13:

$$\text{Schubspannungen im Platteninneren in N/mm}^2: \tau = \frac{Q}{b \cdot t} \quad (13)$$

Tabelle 23: Übersicht der ermittelten Bruchmomente nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung an Faser-Sandwichplatten in den Rohdichten von 300 kg/m³ und 400 kg/m³ sowie zu Vergleichszwecken an konventionell hergestellten Spanplatten (650 kg/m³)

Plattenvariante	Rohdichte in kg/m ³	3-Punkt-Biegung nach EN 310		4-Punkt-Biegung nach DIN 53293	
		Kraftmaximum in N	Bruchmoment in Nmm	Kraftmaximum in N	Bruchmoment in Nmm
40 % Fasern + 60 % Popcorn	300	169,6 (± 13)	16.110 (± 1231)	444,3 (± 20)	19.584 (± 984)
50 % Fasern + 50 % Popcorn	300	361,3 (± 28)	34.320 (± 2692)	621,7 (± 60)	27.590 (± 3060)
60 % Fasern + 40 % Popcorn	300	415,4 (± 14)	39.460 (± 1351)	728,2 (± 14)	31.857 (± 622)
40 % Fasern + 60 % Popcorn	400	317,8 (± 13)	30.189 (± 1227)	508,6 (± 33)	22.249 (± 1440)
50 % Fasern + 50 % Popcorn	400	390,9 (± 42)	37.132 (± 3990)	713,5 (± 32)	31.216 (± 1389)
60 % Fasern + 40 % Popcorn	400	459,9 (± 45)	43.691 (± 4248)	850,3 (± 60)	37.200 (± 2604)
Spanplatte	500	277,0 (± 64)	26.294 (± 840)	571,8 (± 30)	27.160 (± 820)
Spanplatte	650	508,0 (± 72)	48.260 (± 953)	1.005,0 (± 48)	47.975 (± 670)

5.2.2.1.2 Entwicklung von UF-Harz gebundenen, popcornbasierten Sandwichverbundplatten im Zweischritt-Verfahren

Neben der Herstellung von Sandwichplatten im Einschritt-Verfahren werden auch Sandwichplatten im Zweischritt-Verfahren gefertigt und geprüft. Hierbei werden zuerst Popcornverbundplatten hergestellt und anschließend mit ausgewählten dünnen sowie steifen Materialien beplankt. Bei der Auswahl der Beschichtungen wird zusätzlich darauf geachtet, dass die Gesamtrohdichten der popcornbasierten Sandwichplatten deutlich unterhalb des Grenzbereiches von 500 kg/m³ für leichte Plattenwerkstoffe bleiben (Stosch, 2004). Innerhalb der Versuchsreihe VIII und IX kommen für die Beschichtungen der Popcornverbundplatten industriell gefertigte Materialien zum Einsatz (vgl. Kap. 3.4.2, Tab. 15). Hierbei werden ausschließlich dünne Materialien mit einem möglichst hohen Elastizitätsmodul ausgewählt, umso eine möglichst steife Sandwichplatte zu realisieren. Die Kenndaten der im Rahmen der Sandwichherstellung verwendeten Beschichtungen sind der folgenden Tabelle 24 zu entnehmen:

Tabelle 24: *Kenndaten der verwendeten Deckschichtmaterialien*

Beschichtungsmaterial	Materialdicke in mm	Elastizitätsmodul in N/mm ²
Buchen-Sperrholz	3,0	14.200
Pappel-Sperrholz	3,0	4.500
Dünn-Spanplatte	3,0	2.500
Dünn-Faserplatte	3,0	4.500
High Pressure Laminate	0,5	10.000
Aluminium	0,5 bzw. 0,8	60.000

Versuchsreihe VIII.a: Einfluss unterschiedlicher Deckschichtmaterialien auf die Biegeeigenschaften der im Zweischritt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten ermittelt nach der 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Belastungsmöglichkeiten der Sandwichverbundplatten, die sich hinsichtlich ihrer Deckschichtmaterialien unterscheiden, sind durch die ermittelten Bruchmomente nach EN 310 (3-Punkt-Biegeprüfung) in Abbildung 31 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass fast alle Sandwichverbundplatten, mit Ausnahme der Dünn-Spanplattenbeschichtung, Bruchmomente aufweisen, die oberhalb von 50.000 Nmm liegen. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den Bruchmomenten der Referenzspanplatten (Rohdichte 660 kg/m³; Dicke 19 mm sowie Rohdichte 600 kg/m³; Dicke: 25 mm) macht deutlich, dass die Verbundplatten hergestellt im Zweischritt-Verfahren dem Tragverhalten einer typischen Spanplatte für die Innenanwendung genügen und gleichzeitig eine um etwa 45 % reduzierte Rohdichte aufweisen.

Eine genauere Betrachtung der beschichteten Sandwichplatten hinsichtlich des Bruchmoments macht deutlich, dass die Eigenschaften wie die Elastizitätsmoduln sowie die Dicken der einzelnen Beschichtungsmaterialien einen enormen Einfluss auf das Tragverhalten des gesamten Sandwichverbundes ausüben. Es zeigt sich, dass bei einer Beschichtung mit Dünn-Spanplatten die Bruchmomente der Sandwichplatten mit etwa 32.000 Nmm sehr niedrig ausfallen, während die erzielten Momente der mit Dünn-MDF beschichteten Platten um den Faktor 2 höher liegen. Ähnliche Biegeeigenschaften zeigen die Sandwichplatten mit den Beschichtungen HPL und Aluminium, wobei die HPL-Beschichtung einen guten Kompromiss zwischen erzielter Tragfähigkeit und notwendiger Rohdichte der Sandwichplatten darstellt. Mit einer sehr dünnen Beschichtung (Dicke 0,5 mm) und gleichzeitig einer sehr niedrigen Gesamtrohdichte der Platte (ca. 360 kg/m³) kann eine hohe Tragfähigkeit mit einem Bruchmoment von etwa 55.350 Nmm erreicht werden. Das würde den Ansprüchen der Möbelbranche genügen.

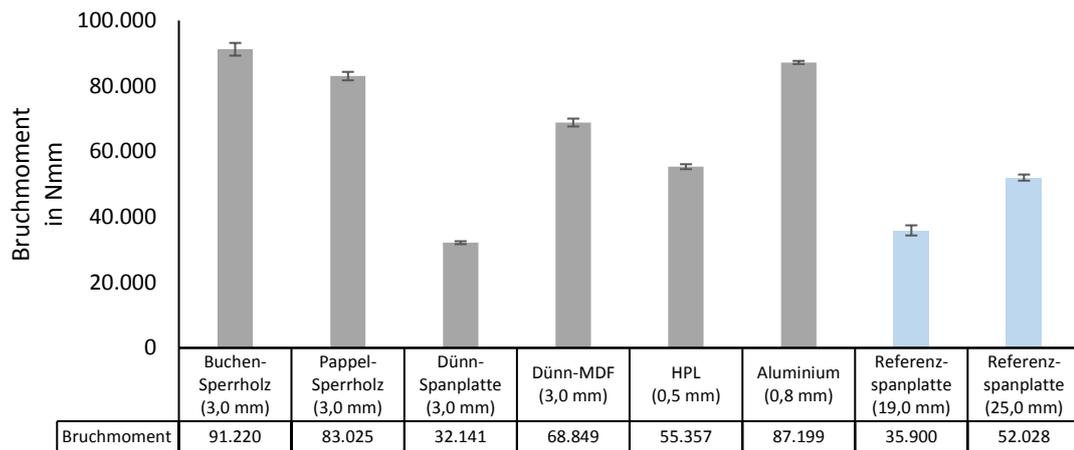


Abbildung 31: Durch 3-Punkt-Biegung ermittelte Bruchmomente der im Zweischritt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten (Rohdichte der Popcornverbundplatten 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) mit den verwendeten Deckschichtmaterialien Buchen- bzw. Pappel-Sperrholz, HPL, Aluminium, Dünn-Spanplatte sowie Dünn-MDF; Bruchmomente von Referenzspanplatten des Typs P2 (Rohdichte 660 kg/m^3 ; Dicke 19 mm sowie Rohdichte 600 kg/m^3 ; Dicke: 25 mm).

Aus der Abbildung 31 ist weiter ersichtlich, dass die Sandwichplatten mit Beschichtungen aus Buchen- bzw. Pappel-Sperrholz ebenfalls diesen Anforderungen genügen, wobei berücksichtigt werden muss, dass diese Sandwichverbundplatten auf Grund der $3,0 \text{ mm}$ dicken Beschichtungen deutlich höhere Plattendicken aufweisen als bspw. die mit HPL beschichteten Platten. Der E-Modul von HPL liegt durchschnittlich mit ca. 10.000 N/mm^2 um 120% höher als der E-Modul von Pappel-Sperrholz mit ca. 4.500 N/mm^2 , jedoch weist die HPL-Beschichtung lediglich eine Dicke von $0,5 \text{ mm}$ auf und das Sperrholz dagegen eine Stärke von $3,0 \text{ mm}$.

Die Steifigkeit von Pappel-Sperrholz (Nmm^2) beträgt demnach mit:

$$E * I = 4.500 * \frac{50 * 3^3}{12} = 506.250 \quad \text{und ist größer als}$$

die Steifigkeit von HPL (Nmm^2) mit:

$$E * I = 10.000 * \frac{50 * 0,5^3}{12} = 5.208.$$

Auf Grund dieser Faktoren lässt sich erklären, weshalb die Sandwichplatten das jeweilige Tragverhalten aufweisen. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Eigenschaften der Deckschichtmaterialien (Dicke, E-Modul) die Biegeeigenschaften des gesamten Plattenverbundes beeinflussen (KLEIN, 2011). Da die Steifigkeit der Deckschichten durch den E-Modul und zum großen Teil durch die Dicke – auf Grund des Flächenträgheitsmomentes – bestimmt wird, besitzt Sperrholz eine deutlich höhere Steifigkeit als HPL. Hierdurch ist es möglich, dass sperrholzbeschichtete Platten in der Lage sind höhere Bruchmomente zu realisieren.

Mit Blick auf die einzelnen Prüfkörper der Sandwichplatten mit Beplankungen aus Faserplatte bzw. Sperrholz fällt auf, dass die untersuchten Proben während der Krafteinwirkung i. d. R. zuerst

innerhalb der Popcornverbundplatten versagen, wobei es im Bereich der Deckschichten zu keinen oder nur zu schwach ausgebildeten Rissen bzw. Verformungen kommt. Auffällig ist, dass der Ursprung des Versagens immer in der Nähe der Auflager liegt und gleichzeitig einen schrägen Verlauf aufweist. Dieser Verlauf des Bruchs bzw. der Risse deutet auf einen Einfluss von Schubspannungen bzw. Querkraften hin, die während der Biegebelastung im Prüfkörper entstehen. Diese Spannungen verlaufen im Material in gegensätzliche Richtungen mit dem Resultat einer Überlastung des Popcornmaterials und der Ausformung eines Schubbruchs (vgl. Abb. 32). Ein ähnliches Bruchbild kann auch bei FATHI et al. (2013) an polyvinylbasierten Sandwichverbundplatten in Folge einer 4-Punkt-Biegung beobachtet werden.

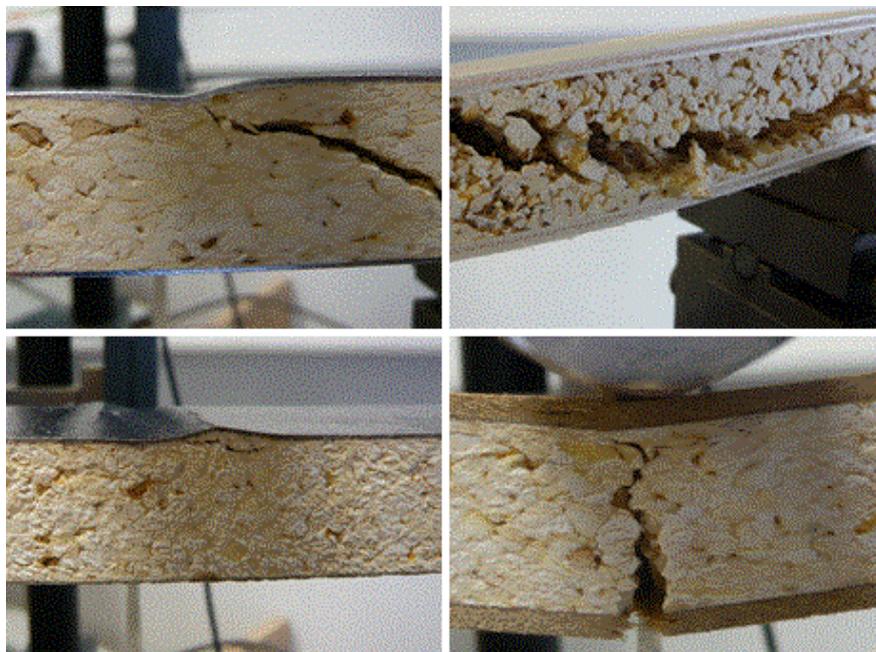


Abbildung 32: Links oben: Aluminium-Sandwichplatte mit lokaler Intrusion; Links unten: Deckschichtversagen an HPL-Sandwichplatte; Rechts oben: Schubbruch an sperrholzbeschichteter Sandwichplatte; Rechts unten: normaler Biegebruch an Faser-Sandwichplatte.

Versuchsreihe VIII.b: Einfluss unterschiedlicher Deckschichtmaterialien auf die Biegeeigenschaften der im Zweischritt-Verfahren hergestellten Sandwichverbundplatten ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

In einem folgenden Versuchsabschnitt werden Popcornverbundplatten innerhalb der Rohdichten 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 hergestellt und mit den vielversprechendsten Deckschichten beschichtet und anschließend mittels der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung auf ihre Eigenschaften hin evaluiert. Aus Abbildung 33 und Tabelle 25 gehen die erzielten Bruchmomente hervor und es wird deutlich, dass i. d. R. Sandwichplatten mit einem Popcornverbund mit einer

Rohdichte von 300 kg/m^3 höhere Festigkeiten erreichen als die mit einer niedrigeren Rohdichte von 200 kg/m^3 . Die höhere Rohdichte eines Popcornverbundes ermöglicht eine größere Stabilität gegenüber Querkräften, die während der Prüfung entstehen und bei schubschwachen Körpern oft zum Bruch führen. Ein ähnliches Verhalten kann auch bei Holzwerkstoffen beobachtet werden, so weisen zahlreiche Angaben in der Literatur auf einen Zusammenhang zwischen den Festigkeitseigenschaften der Werkstoffe und deren Rohdichten hin (WONG et al., 1999; WANG und SUN, 2001; HAYASHI et al., 2003).

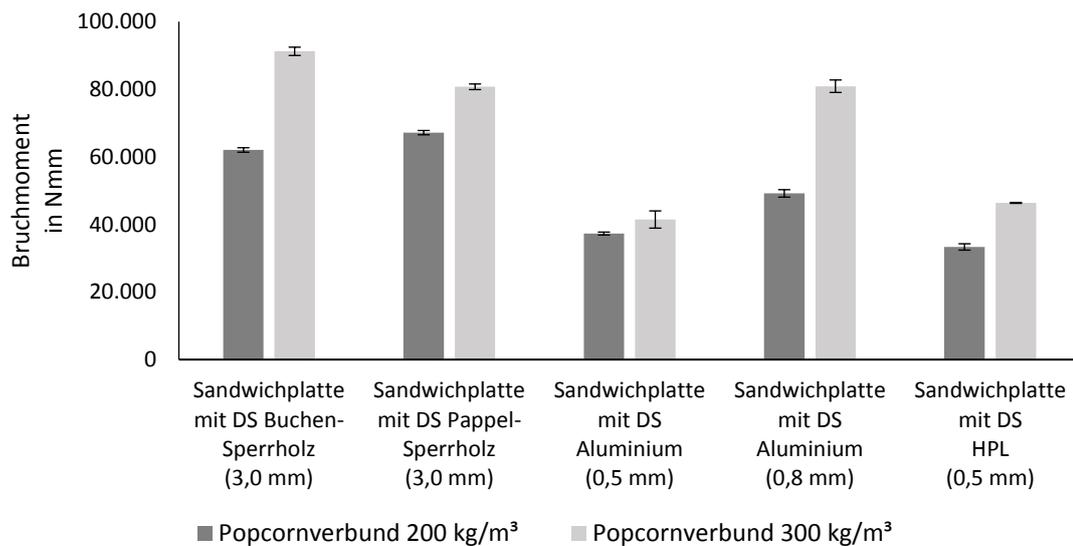


Abbildung 33: Bruchmomente der Sandwichplatten aus Popcornverbundplatten (Rohdichte 200 kg/m^3 und 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm) und unterschiedlichen Deckschichten (DS) ermittelt nach der 3-Punkt-Biegeprüfung (Versuchsreihe VIII.a).

Die Sandwichplatten, beschichtet mit Buchen- bzw. Pappelsperrholz, weisen jeweils bei Erhöhung der Rohdichte des Popcornverbundes signifikante Festigkeitsunterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % auf. Wobei die beschichteten Popcornverbunde mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 bzw. 200 kg/m^3 Bruchmomente von ca. 91.000 Nmm bzw. 62.000 Nmm erzielen. Auffällig ist, dass bei der Buchen-Sperrholz-Variante, unabhängig der Rohdichte des Popcornverbundes, immer ein Schubbruch in der Nähe der Auflager entsteht. Dagegen treten bei den Sandwichplatten mit einer Beschichtung aus Pappel-Sperrholz erst mit einer erhöhten Rohdichte von 300 kg/m^3 vermehrt Schubbrüche im Popcornverbund auf. Folglich reichen die Biegemomente während der Prüfung der Sandwichplatten mit Deckschichten aus Buchen-Sperrholz nicht aus, um die Festigkeiten der Deckschichten zu überlasten, jedoch sind die aus dem Kraftmaximum resultierenden Querkräfte stark genug, um den Kern der Platte durch Schubspannungen zu zerstören. Hingegen reichen die Querkräfte bei den Sandwichplatten mit einer Pappel-Sperrholzbeschichtung nicht aus, um einen Bruch herbeizuführen. Hier besitzen die

Deckschichten eine so geringe Festigkeit, dass das Biegemoment ausreicht, um ein Versagen der Deckschichten und folglich einen Biegebruch herbeizuführen.

Tabelle 25: Bruchmomente der Sandwichplatten aus Popcornverbundplatten (Rohdichte der Popcornverbundplatten 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3) und unterschiedlichen Deckschichten (DS) ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung (Versuchsreihe VIII.b).

Sandwichplatte	Rohdichte in kg/m^3 / Dicke in mm	Bruchmoment in Nmm 3-Punkt-Biegeprüfung	Bruchmoment in Nmm 4-Punkt-Biegeprüfung
Sandwichplatte mit DS Buche (3,0 mm)	370/ 25	62.028 (± 2154)	45.128 (± 1270)
	440/ 25	91.220 (± 1944)	72.390 (± 2051)
Sandwichplatte mit DS Pappel (3,0 mm)	280/ 25	67.156 (± 1580)	48.030 (± 2410)
	390/ 25	80.727 (± 1295)	68.100 (± 1923)
Sandwichplatte mit DS Aluminium (0,5 mm)	330/ 20	37.309 (± 1084)	39.155 (± 1451)
	420/ 20	41.456 (± 1670)	45.060 (± 1548)
Sandwichplatte mit DS Aluminium (0,8 mm)	390/ 21	49.175 (± 2510)	52.918 (± 2451)
	460/ 21	80.896 (± 1542)	72.011 (± 2168)
Sandwichplatte mit DS HPL (0,5 mm)	330/ 20	33.342 (± 1090)	27.497 (± 958)
	410/ 20	46.364 (± 943)	40.483 (± 875)

Die erzielten Ergebnisse hinsichtlich des Tragverhaltens der mit Aluminium beschichteten Sandwichplatten sind äußerst interessant. So weisen die Sandwichplatten – bestehend aus einer 0,5 mm dicken Aluminiumbeschichtung und Popcornverbundplatten mit Rohdichten von 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 – nur ein mäßiges Tragverhalten und keine signifikanten Unterschiede auf. Während der Prüfung ist es bei beiden Varianten (200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3) zu deutlichen lokalen Einsenkungen unterhalb des Biegestempels mit teilweiser Zerstörung der Verbundplatte gekommen (vgl. Abb. 32). Diese Versagensart wird als lokale Intrusion bezeichnet (ALLEN, 1969). Die Entstehung eines solchen Bruchbildes wird durch geringe Materialstärken der Deckschichten sowie eine niedrige Druckfestigkeit des Kernmaterials begünstigt. Die Deckschichten aus Aluminium werden bei stark konzentrierter Belastung nicht direkt zerstört sondern nur verformt und die Prüfung wird weitergeführt bis der Kernverbund eingedrückt bzw. zerstört wird. Hieraus ergibt sich, dass unter Verwendung von Aluminiumbeschichtungen mit einer Stärke von 0,5 mm auf Grund der nicht gegebenen Steifigkeit keine zufriedenstellende Tragfähigkeit erreicht werden kann. Anzumerken ist jedoch, dass durch eine flächigere Verteilung der aufgebrachten Last das Risiko einer lokalen Intrusion deutlich zurückgehen würde. Eine Verstärkung der Aluminiumdeckschicht auf 0,8 mm Dicke kann lediglich bei den beschichteten Popcornverbundplatten mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 eine lokale Intrusion verhindern und eine signifikante Festigkeitszunahme bewirken. Bei einer Rohdichte von 200 kg/m^3 werden die Aluminiumdeckschichten, trotz der höheren Deckschichtdicken, stark eingedrückt und die

Prüfkörper versagen ebenfalls auf Grund einer Intrusion. Die beobachteten Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass für die Stabilität des Sandwichverbundes bei Einsatz weniger steifer Materialien eine Verbundplatte mit einer Mindestdruckfestigkeit erforderlich ist, die erst ab einer Rohdichte von $> 200 \text{ kg/m}^3$ gegeben ist.

Neben der 3-Punkt-Biegeprüfung werden die Sandwichplatten auch mittels 4-Punkt-Biegeprüfung getestet. Hierbei zeigt sich, dass die Bruchmomente stets zwischen den angewendeten Prüfmethoden variieren und die aus der 4-Punkt-Biegeprüfung resultierenden Momente in fast allen Fällen unterhalb der erzielten Bruchwerte aus der 3-Punkt-Biegung liegen. Diese Unterschiede werden auch bei Sandwichplatten, die mittels Einschnitt-Verfahren hergestellt wurden, beobachtet (vgl. Abschnitt 5.2.2.1.1 Abb. 30). Aus Tabelle 25 geht hervor, dass die beiden Prüfmethoden Differenzen zwischen 12 % und 37 % hinsichtlich der Bruchmomente aufweisen. Die sperrholzbeschichteten Sandwichplatten (Rohdichte der Popcornverbundplatten 300 kg/m^3 ; Deckschichten Buchen- bzw. Pappel-Sperrholz) erreichen mittels 3-Punkt-Biegung die höchsten Bruchmomente und eine wiederholte Prüfung durch eine 4-schnittige Prüfvorrichtung reduziert das ermittelte Bruchmoment um 37 % bzw. 39 %. Nur im Falle der Sandwichplatten mit einer Aluminiumbeschichtung werden durch Prüfungen mit der 4-schnittigen Prüfmethode höhere Bruchmomente erzielt. Das liegt vorrangig daran, dass durch die 3-Punkt-Biegung die Kraft zu konzentriert auf die Platten aufgebracht und eine lokale Intrusion ausgelöst wird (vgl. Abb. 32). Hierbei versagen die Platten verfrüht, weil die Druckfestigkeit und nicht die Schubfestigkeit der Popcornverbundplatten zu gering ist. Die ermittelten Ergebnisse zeigen zwischen den beiden Prüfmethoden signifikante Unterschiede auf, lediglich die erzielten Bruchmomente der mit Aluminium (0,5 mm) beschichteten Verbundplatten weisen keine signifikanten Unterschiede auf.

Es zeigt sich, dass für die ermittelten Bruchmomente während der 3-Punkt-Biegung hauptsächlich die biegesteifen Deckschichten verantwortlich sind, da bei dieser Prüfungsmethode im Vergleich zur 4-Punkt-Biegung ein starkes Biegemoment ausgebildet wird. Es ist bekannt, dass die aus dem Biegemoment resultierenden Biegespannungen hauptsächlich von den Deckschichten aufgenommen werden und somit ein hohes Bruchmoment erreicht werden kann (WIEDEMANN, 2006).

Dagegen werden bei der 4-Punkt-Biegeprüfung zusätzlich neben den Deckschichten, auf Grund erhöhter Querkräfte, die schubschwachen Verbundplatten getestet. Die ermittelten Differenzen zeigen deutlich, dass die Verwendung der 3-Punkt-Biegung das Tragverhalten von Sandwichplatten nicht richtig wieder gibt. Hiermit ist gemeint, dass die Anwendung einer anderen Belastung, wie eine auflagnähere Einzellast, zu starken Schubspannungen führen kann, die auch

deutlich früher ein Versagen des Plattenverbundes auslösen würden als von der 3-Punkt-Biegung vorgegeben.

Mit Hilfe der nachfolgenden Untersuchungen der auf dem Holzwerkstoffmarkt etablierten Plattenwerkstoffe sollen die popcornbasierten Sandwichplatten hinsichtlich der Biegeeigenschaften eingeordnet werden.

Hierzu zeigt Tabelle 26 die ermittelten Bruchmomente der industriell gefertigten Leichtbauplatten sowie herkömmlicher Spannplatten des Typs P2 der Firma Pfeleiderer GmbH & Co. Kg, D-33332 Gütersloh. Diese Plattenwerkstoffe werden hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht und evaluiert, um anschließend die popcornbasierten Sandwichplatten mit diesen zu vergleichen. Anhand der ermittelten Ergebnisse wird deutlich, dass die sehr unterschiedlichen Plattenwerkstoffe auch sehr verschiedene Bruchmomente aufweisen. Ein Vergleich der Bruchmomente von Papierwaben- und Spannplatten, ermittelt nach der 3-Punkt-Biegeprüfung, zeigt deutliche Unterschiede. So weisen 25 mm starke Spannplatten im Vergleich zu 27 mm starken Papierwabenplatten etwa 36 % niedrigere Bruchmomente auf. Hierbei muss beachtet werden, dass die Spannplattenverbunde eine ca. 60 % höhere Rohdichte besitzen als die Wabenplatten. Hingegen sind die Unterschiede hinsichtlich der Bruchmomente dieser beiden Plattentypen, ermittelt nach der 4-Punkt-Biegeprüfung, nicht mehr so stark ausgeprägt. Liegt das Bruchmoment für Papierwabenplatten nach der 3-Punkt-Biegung noch bei ca. 81.300 Nmm, so liegt das Bruchmoment nach Anwendung der 4-Punkt-Biegung lediglich noch bei ca. 49.400 Nmm. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Anwendung der 3-schnittigen Biegeprüfung die Bruchmomente einer Papierwabenplatte um ca. 64 % überschätzt werden. Hierbei wird deutlich, dass eine Papierwabenplatte eine deutliche Schubempfindlichkeit innerhalb des Papierwabensteiges aufweist und es auf Grund der verursachten Querkräfte zum Bruch kommt. Die 4-Punkt-Biegeprüfung verursacht ein geringeres Biegemoment dafür entstehen jedoch höhere Schubspannungen, die zum Bruch führen.

Tabelle 26: Bruchmomente von industriell gefertigten Leichtbauplatten sowie Spannplatten ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung (Angabe der Standardabweichung vgl. Kap. 10.3, Tab. 36)

Plattenvariante	Rohdichte in kg/m ³ ; Dicke in mm	Bruchmoment in Nmm 3-Punkt-Biegung	Bruchmoment in Nmm 4-Punkt-Biegung
Papierwabenplatte	380/ 27	81.320	49.460
Tischlerplatte	370/ 20	115.840	92.250
BalanceBoard	550/ 19	19.900	17.250
	510/ 28	45.170	38.790
Spanplatte	790/ 10	14.010	13.320
	660/ 19	35.900	31.230
	600/ 25	52.030	43.220

Spanplatten sind homogene, isotrope Werkstoffe und sollen nach EN 310 mittels 3-Punkt-Biegung evaluiert werden, da bei diesen Werkstoffen ein Schubeinfluss – solange das Stützweiten/ Längen-Verhältnis eingehalten wird – nicht vorhanden oder nur sehr gering ist (EIERLE et al., 2008). Aus Tabelle 26 geht hervor, dass sich die Bruchmomente, ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegung, für Spanplatten mit Plattendicken von 10 mm nicht signifikant unterscheiden. Jedoch nehmen die Differenzen zwischen den Prüfmethode mit zunehmender Plattendicke zu. So erzielen Spanplatten mit Dicken von 25 mm nach Anwendung der 3-Punkt-Biegeprüfung ca. 20 % höhere Bruchmomente als nach der 4-Punkt-Biegung. Es verhält sich vermutlich so, dass die Festigkeit in der Mitte des Plattenverbundes mit steigender Plattendicke abnimmt und damit die Empfindlichkeit gegenüber Schubeinwirkungen zunimmt. Folglich muss geprüft werden, ob bei stärker dimensionierten Spanplatten das Verhältnis Stützweitenabstand/ Dicke erhöht werden muss, um so den Schubeinfluss auf die Platten zu minimieren (vgl. Kap. 3.3.4.2, Abb. 6) oder ob statt der 3-Punkt- eher die 4-Punkt-Biegeprüfung angewendet werden sollte.

Ein Vergleich der untersuchten Leichtbauplatten bzw. Spanplatten mit den popcornbasierten Sandwichplatten zeigt, dass die entwickelten Sandwichplatten auf Grund der reduzierten Rohdichte alle der Kategorie Leichtbau angehören (STOSCH, 2004). Weiterhin besitzen die Sandwichplatten mit Plattendicke von 20 mm ähnliche oder bessere Biegeeigenschaften als herkömmliche Spanplatten (20 mm). Die untersuchten mit HPL beschichteten Sandwichplatten erreichen Bruchmomente von etwa 40.400 Nmm und liegen damit um ca. 30 % höher als die erreichten Bruchmomente der Spanplatten. Gleichzeitig weisen die Sandwichplatten eine 37 % niedrigere Rohdichte auf als die Spanplatten. Die Sandwichplatten, beschichtet mit Sperrholz (Buchen- bzw. Pappel-Sperrholz, Rohdichte Verbundplatte 200 kg/m³), und die Papierwabenplatten besitzen in etwa dieselben Rohdichten und weisen dieselben Plattendicken auf und aus den Ergebnissen geht hervor, dass die popcornbasierten beschichteten Verbundplatten lediglich 8 % geringere Bruchmomente realisieren. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass durch eine Rohdichteerhöhung des Popcornverbundes auf 300 kg/m³ die Bruchmomente mit fast 72.400 kg/m³ oberhalb der von Papierwabenplatten mit 49.500 kg/m³ liegen. Jedoch muss hier berücksichtigt werden, dass damit auch die Rohdichte der Popcorn-Sandwichplatten um 15 % höher ausfällt.

Anhand dieses Versuchsabschnittes kann festgehalten werden, dass die entwickelten Sandwichplatten mit modernen Leichtbauplatten hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften konkurrenzfähig sind. Jedoch sollte in weiterführenden Untersuchungen das Verhältnis zwischen Rohdichte und gewünschten oder notwendigen Biegeeigenschaften

untersucht werden. Denn durch Überdimensionierung der Platteneigenschaften werden Ressourcen nicht effizient eingesetzt.

Versuchsreihe IX: Einfluss der Plattendicke auf die Biegeeigenschaften der Sandwichverbundplatten

Innerhalb der Versuchsreihe IX wird der Einfluss der gesamten Plattendicke auf die Biegeeigenschaften der Sandwichverbundplatten unter Verwendung der 3-Punkt- sowie der 4-Punkt-Biegeprüfung analysiert. Hierzu werden die hergestellten popcornbasierten Verbundplatten in den Dicken 10 mm, 20 mm sowie 25 mm beidseitig mit HPL (Dicke 0,5 mm) beschichtet und mittels der ausgewählten Prüfmethode geprüft. Neben der Untersuchung der Biegeeigenschaften sollen im folgenden Kapitel die Unterschiede zwischen den Prüfmethode und deren Eignung zur Bewertung von leichten Verbundplatten explizit herausgearbeitet werden. Die folgende Abbildung 34 zeigt, dass die Tragfähigkeit der Sandwichplatten mit Zunahme der Plattendicke von 10 mm auf 25 mm unabhängig vom Prüfverfahren steigt. Wobei die geprüften Platten durch die Anwendung der 3-Punkt-Biegung stets höhere Festigkeiten erzielen als mit der 4-Punkt-Biegeprüfung. Hierbei erreichen die Verbundplatten (geprüft nach 3-Punkt-Biegemethode) mit Dicken von ca. 10 mm die geringsten Bruchmomente von ca. 14.700 Nmm. Eine Erhöhung der Plattendicken um 10 mm bzw. 15 mm bewirkt Verbesserungen der Tragfähigkeiten um 82 % bzw. 134 % auf fast 27.000 Nmm bzw. 34.500 Nmm. Dagegen erzielen die mittels 4-Punkt-Biegeprüfung belasteten Sandwichplatten lediglich Bruchmomente von ca. 10.600 Nmm für 10 mm dicke Platten. Die höchste Tragfähigkeit erzielen nach der 4-Punkt-Biegung ebenfalls die Sandwichplatten mit Dicken von 25 mm, hier werden Bruchmomente von ca. 31.200 Nmm erreicht. Die Unterschiede zwischen den Prüfmethode liegen zwischen 9 % und 27 % und nehmen mit abnehmender Plattendicke zu. Die unterschiedlichen Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine der beiden Prüfmethode die Eigenschaften bzw. die Tragfähigkeiten der Sandwichplatten nicht richtig wiedergibt (vgl. Kap. 5.2.2.1.1, Tab. 23).

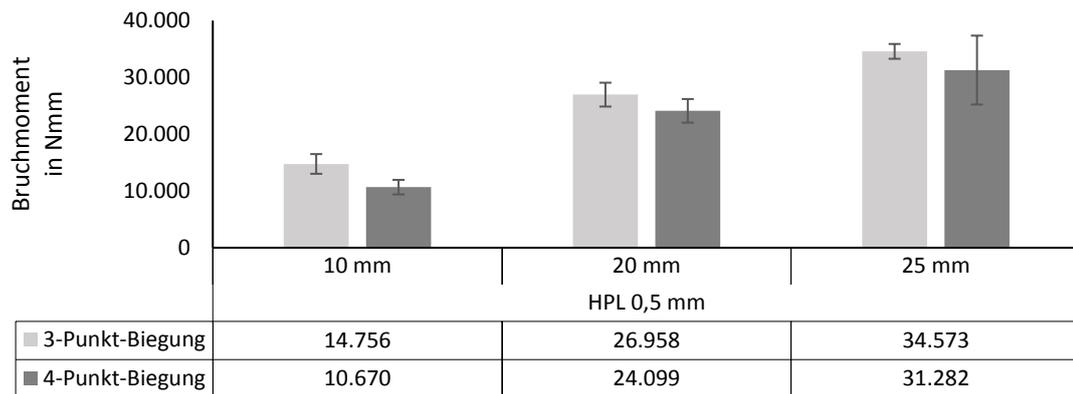


Abbildung 34: Bruchmomente der HPL beschichteten Sandwichplatten (Rohdichte der Verbundplatte 200 kg/m^3) geprüft nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung.

Abbildung 35 zeigt skizzenhaft den Verlauf des Bruchmoments sowie der Querkräfte innerhalb einer Platte, die nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung getestet werden. Es wird deutlich, dass die Momente sowie Querkraftverläufe vom statischen System abhängen und sich unterscheiden. Bei der 3-Punkt-Biegeprüfung verlaufen die aus dem Kraftmaximum (F_{\max}) resultierenden Querkräfte ($F_{\max}/2$) über die gesamte Prüfstrecke, also vom Biegestempel bis zum Auflager. Hieraus folgt, dass es bei dieser Prüfungsmethode keinen querkraftfreien Bereich gibt. Das Bruchmoment verläuft linear über die Prüfstrecke, wobei das Maximum direkt unterhalb des Prüfstempels erreicht wird. Bei dieser Prüfung handelt es sich hinsichtlich der Lastenverteilung und dem daraus resultierenden Bruchmoment um das statisch ungünstigste System. Die 4-Punkt-Biegeprüfung verursacht einen etwas anderen Kräfte- und Momentenverlauf. Bei dieser Methode wird das Kraftmaximum über zwei Biegestempel auf den Prüfkörper aufgebracht. Durch diese Lastenverteilung ist es möglich den Prüfkörper insgesamt mit einer größeren Maximalkraft zu belasten, da an jedem Stempel nur die halbe Maximalkraft wirkt.

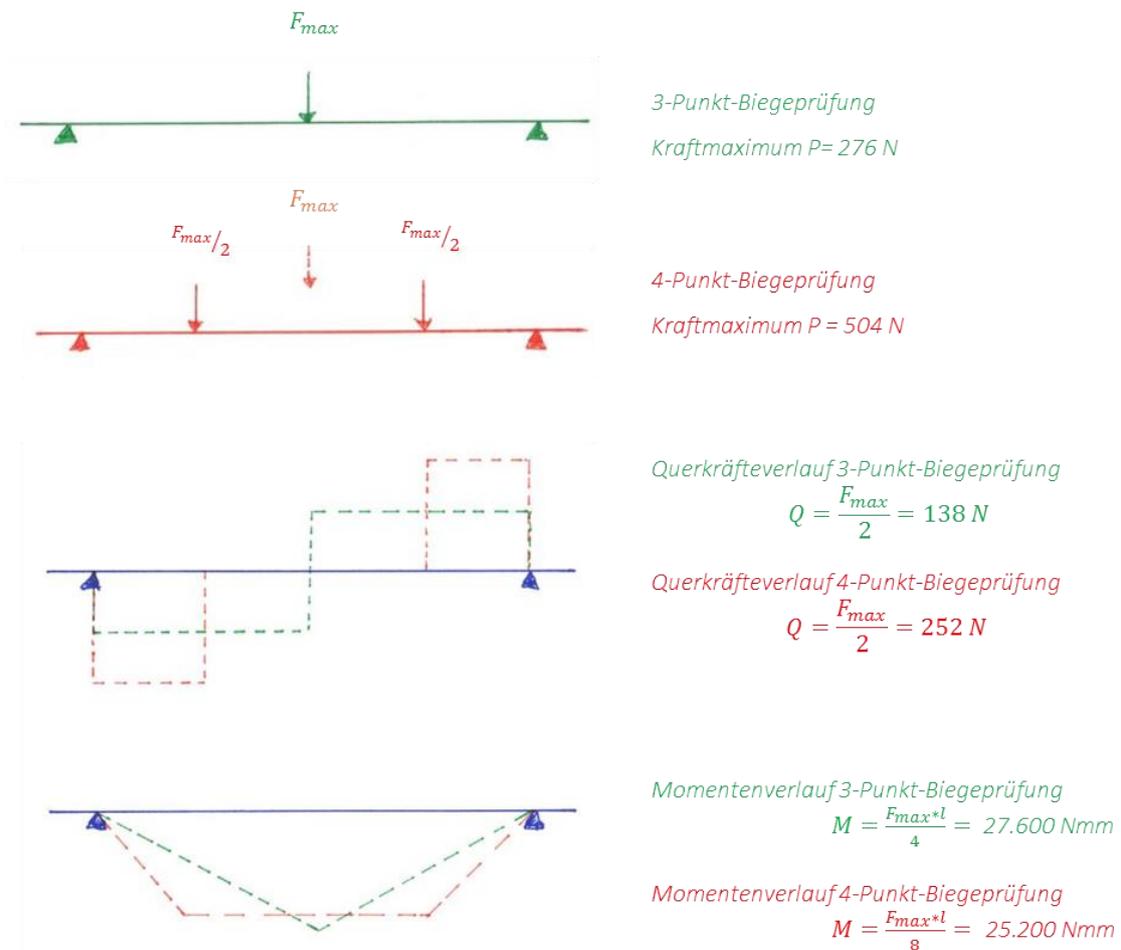


Abbildung 35: Vergleich von Momenten- und Querkräfteverlauf während der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung anhand eines Beispiels an einer Verbundplatte (Dicke 20 mm) (nach Schneider, 1986).

Aus der höheren Maximalkraft resultiert jedoch eine deutlich höhere Querkraft, die sich auf Grund des statischen Systems und der hiermit einhergehenden Belastungsform nur in den Bereichen zwischen Auflager und Biegestempel verteilt. Folglich gibt es zwischen den zwei Biegestempeln einen querkraftfreien Bereich. Dagegen ist das Bruchmoment bei dieser Prüfungsart geringer, da die Kraft über zwei Biegestempel aufgebracht wird. Hieraus folgt, dass während einer 3-schnittigen Biegeprüfung die Momente bzw. Biegespannungen größer sind und einen Bruch verursachen, dagegen wird bei einer 4-schnittigen Biegung ein Prüfkörper deutlich stärker durch die verursachten Querkräfte belastet, woraus wiederum ein starker Schubeinfluss resultiert. Durch diese Belastungsform üben die Schubspannungen einen größeren Einfluss aus, d. h. die Schubspannungen haben einen größeren Anteil und führen schließlich zum Bruch (SCHNEIDER, 1986; EIERLE et al., 2008). Eine Sandwichkonstruktion reagiert auf Grund des Plattenaufbaus – mit den steifen Deckschichten und dem leichten und schubweichen

Kernmaterial – deutlich empfindlicher gegenüber Schub- als gegenüber Biegespannungen (WIEDEMANN, 2006; KLEIN, 2011).

Daher ist die Verwendung der 4-Punkt-Biegeprüfung für schubempfindliche Plattenaufbauten sinnvoll, um so eine zu positive Bewertung und damit einhergehend eine Überschätzung der Platteneigenschaften zu vermeiden. Mit dieser Prüfmethode wird speziell der Schwachpunkt, also der schubschwache Kern der Sandwichplatte, geprüft.

Zusammenfassend zeigt dieser Versuchsabschnitt, dass

- eine steigende Plattendicke sich positiv auf das Tragverhalten von Sandwichverbundplatten auswirkt. Eine Erhöhung der Plattendicke bewirkt eine Verbesserung des Widerstandsmoments, hierdurch nehmen, unabhängig der Prüfvorschrift, das Kraftmaximum und gleichzeitig das Bruchmoment zu.
- sich eine Erhöhung der Plattendicke, auf Grund des steigenden Kraftmaximums, ebenfalls auf den Querkraftverlauf auswirkt. Ein steigendes Kraftmaximum führt zu höheren Querkraften. Die Querkraften im Platteninneren steigen an und gleichzeitig nimmt die Empfindlichkeit der Platte gegenüber Schubeinflüssen deutlich zu, da eine Erhöhung der Plattendicke sich negativ auf das Rohdichteprofil auswirkt. Es gilt je dicker eine Platte ist, umso geringer ist ihr Schubtragverhalten.

Neben dem Tragverhalten spielt auch die Verformung einer Platte unter Biegebelastung eine große Rolle. Um die Durchbiegung einer Platte zu beurteilen, wird die Stützweite mit der Verformung während der Prüfung ins Verhältnis gesetzt, umso einen Durchbiegungsfaktor zu ermitteln. Ein geringes Verhältnis aus Stützweite und Durchbiegung, also ein niedriger Durchbiegungsfaktor, besagt eine hohe Verformung der Platte. Zu Vergleichszwecken werden in der Tabelle 27 neben den HPL beschichteten Sandwichplatten ebenfalls die Verformungen von herkömmlichen Spanplatten (Rohdichte 650 kg/m^3 ; Typ P2) sowie von BalanceBoards (Rohdichte $< 500 \text{ kg/m}^3$, Dicke 19 mm bzw. 28 mm) aufgeführt. Die mittels 3-Punkt-Biegeprüfung und unter Berücksichtigung des nach Norm geforderten Stützweitenabstandes (20-fache der Dicke) geprüften Spanplatten verformen sich um den Durchbiegungsfaktor 60. Die Verformungen der Sandwichplatten, verursacht durch eine 3-Punkt-Biegeprüfung, sind abhängig von der Plattendicke und liegen zwischen 45 und 49. Im Vergleich zur Spanplatte wird eine 20 % bis 26 % höhere Durchbiegung erreicht. Die Durchbiegungen der geprüften BalanceBoards liegen im Bereich der Spanplatten bei 57 für 19 mm starke Platten bzw. 67 bei 28 mm starke Platten.

Es zeigt sich, dass durch die 4-Punkt-Biegeprüfungen größere Durchbiegungen bei den Sandwichplatten verursacht werden als durch 3-Punkt-Biegungen, hierbei liegen die

Durchsenkungen in etwa um 20 % bis 30 % höher. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Durchsenkungen bei den untersuchten Spanplatten unabhängig von den Prüfmethode sind. Die 3-Punkt- bzw. die 4-Punkt-Biegeprüfungen haben bei homogenen Spanplatten keinen Einfluss auf die Durchbiegungen. Jedoch werden bei den untersuchten BalanceBoards Unterschiede bei den Durchbiegungen in Abhängigkeit der Prüfmethode ermittelt. Ein BalanceBoard, geprüft nach der 4-Punkt-Biegeprüfung, wird in etwa um 20 % stärker verformt als nach der 3-Punkt-Biegung. Bei diesem Plattentyp handelt es sich um eine rohdichtereduzierte Spanplatte, die nicht mehr über einen so homogenen Plattenaufbau verfügt wie eine herkömmliche Spanplatte. Es zeigt sich, dass die Wahl der Belastungsart sich direkt auf die Verformung auswirkt.

Tabelle 27: Durchbiegungsfaktoren von Sandwichplatten, Spanplatten sowie BalanceBoards ermittelt nach der 3-Punkt- sowie 4-Punkt-Biegeprüfung

Plattenvariante	Plattendicke in mm/ Stützweitenabstand in mm	Durchbiegungsfaktor 3-PunktBiegeprüfung	Durchbiegungsfaktor 4-Punkt-Biegeprüfung
Sandwichplatte mit DS HPL (0,5 mm)	10/200	49	39
	20/400	45	30
	25/500	48	35
Spanplatte	10/200	54	55
	19/400	58	44
	25/500	59	48
BalanceBoard	19/400	57	45
	28/560	67	53

Bei Werkstoffen, die auf Biegung belastet werden, kann eine Verformung – die sich aus Schub- sowie Biegeverformungen zusammensetzt – beobachtet werden. Mit Hilfe der Partialdurchsenkung ist eine Bestimmung der Gesamtverformung des Werkstoffes möglich. Die Gesamtverformung setzt sich aus reiner Biege- sowie Schubverformung zusammen (vgl. Abb. 36) (ALLEN, 1969; STAMM und WITTE, 1974; KLEIN, 2011).

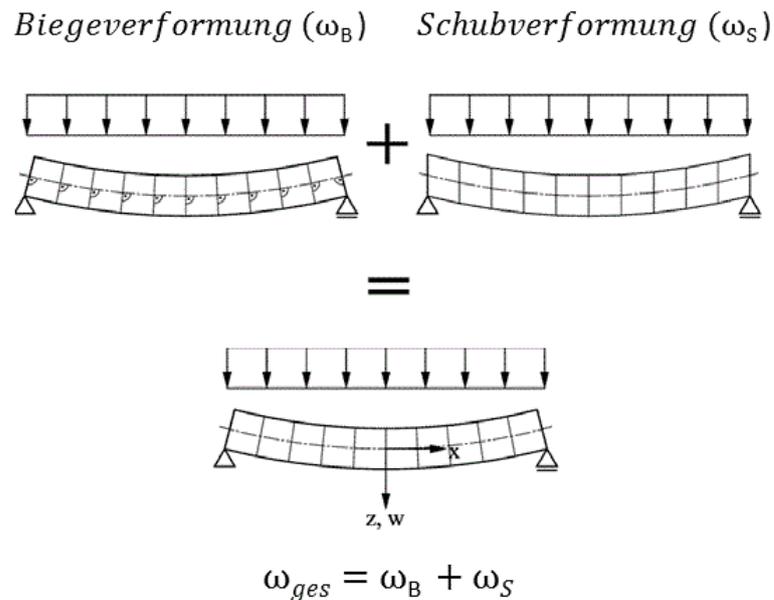


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Partialdurchsenkung (nach KLEIN, 2011).

Die durch Biegeverformungen verursachten Durchbiegungen können über die folgenden Gleichungen 14 und 15 beschrieben werden, hierbei wird zwischen der 3-Punkt- und der 4-Punkt-Biegung unterschieden (WAGNER und ERLHOF, 1991).

$$\text{Biegeverformung in mm nach EN 310} \quad \omega_B = \frac{M_{max} \cdot l^2}{12 \cdot E \cdot I} \quad (14)$$

$$\text{Biegeverformung in mm nach DIN 53 293} \quad \omega_B = \frac{M_{max} \cdot l^2}{8,73 \cdot E \cdot I} \quad (15)$$

Aus den Gleichungen wird die Abhängigkeit der Biegeverformung von den erreichten Bruchmomenten der Plattenwerkstoffe sowie den Plattensteifigkeiten ($E \cdot I$) deutlich. Es folgt, je höher ein Bruchmoment einer Platte liegt, umso stärker fällt die Verformung aus. Zusätzlich kann anhand der Gleichungen gezeigt werden, dass die Verformung während einer 4-Punkt-Biegung deutlich stärker ausgeprägt ist. Auf Grund des statischen Systems ist die Verformung während einer 4-Punkt-Biegeprüfung trotz eines gleichen Bruchmomentes um ca. 37 % ungünstiger.

Dagegen wird die Durchbiegung auf Grund von Schubverformungen maßgeblich durch Querkräfte sowie Schubsteifigkeit ($G \cdot A$) beeinflusst. Hierbei gelten die Abhängigkeiten der folgenden Gleichungen 16 und 17.

$$\text{Schubverformung in mm nach EN 310} \quad \omega_S = \frac{F_{max} \cdot l}{4 \cdot G \cdot A} \quad (16)$$

$$\text{Schubverformung in mm nach DIN 53 293} \quad \omega_S = \frac{F_{max} \cdot l}{8 \cdot G \cdot A} \quad (17)$$

(Erläuterungen zu den Gleichungen 14, 15 sowie 16, 17 vgl. Kap. 10.1)

Die Gleichungen 16 und 17 zeigen, dass die Schubverformung einer Sandwichplatte vom Schubmodul des Kerns abhängt. Je schwächer das Schubmodul (G) ausgeprägt ist umso stärker wird sich der Werkstoff verformen. Die Verformung ist neben dem Schubmodul (G), dem Stützweitenabstande (l_1) sowie dem Flächenquerschnitt (A) auch vom Kraftmaximum (F_{max}) abhängig. Wie bereits in Versuchsreihe VIII erläutert, ist es möglich auf Grund der zwei Krafteinleitungspunkte den Werkstoff mit einem größeren Kraftmaximum zu belasten (vgl. Abb. 35). Aus den größeren Belastungen während der 4-Punkt-Biegeprüfung resultieren zwar größere Querkräfte ($\frac{F_{max}}{2}$), jedoch ist die stärker ausgeprägte Verformungen nur bedingt auf die Schubverformung zurückzuführen. Auf Grund der Gleichungen 16 und 17 sowie den Ergebnissen aus Kap. 5.2.2.1, Tab. 25 kann vermutet werden, dass die Schubverformungen in den belasteten Platten bei Anwendung der beiden statischen Systemen (3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung) ungefähr gleich groß sind.

Zusammenfassend zeigt dieser Versuchsabschnitt, dass

- die Verwendung eines Durchbiegungsfaktors zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit der Sandwichplatten möglich ist. Ferner eignet sich dieser Faktor auch, um die Sandwichplatten mit anderen Leichtbauplatten zu vergleichen.
- die popcornbasierten Sandwichplatten durch eine 4-Punkt-Belastung immer stärker verformt werden als durch eine 3-Punkt-Biegung, hierbei liegen die Durchbiegungen um etwa 20 % bis 30 % höher.
- die Durchbiegungen von Spanplatten geringer ausfallen als die der Sandwichplatten. Die Sandwichplatten erreichen im Vergleich zu den untersuchten Spanplatten ca. 20 % bis 26 % höhere Verformungen.

5.2.2.2 Zusammenfassung der Untersuchungen zu den Biegeeigenschaften

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass die ermittelten Biegeeigenschaften der Sandwichplatten vom Herstellungsverfahren, Material, Plattendicke sowie vom Prüfverfahren abhängig sind. Hierbei zeigt sich, dass

- bei Anwendung des einschrittigen Herstellungsverfahrens Faser-Sandwichverbundplatten – mit Deckschichtanteilen von 40 % und einer Mindestrohddichte von 400 kg/m^3 – Bruchmomente aufweisen, die mit dem Tragverhalten von Spanplatten des Typs P2 konkurrieren können. Weiterhin führt ein höherer Faseranteil in den Deckschichten ($\geq 50 \text{ Gew.-%}$) dazu, dass die Rohddichte auf etwa 300 kg/m^3 verringert werden kann, ohne hierbei die Bruchmomente der

Sandwichplatten negativ zu beeinflussen. Die Sandwichplatten können trotz der geringen Rohdichte das Tragverhalten einer Spanplatte erreichen.

- sich die Deckschichtmaterialien HPL, Sperrholz sowie Dünn-MDF sehr gut eignen, um Sandwichplatten im Zweischritt-Verfahren zu formen.
- die mittels 4-Punkt-Biegeprüfung ermittelten Bruchmomente stets unterhalb der erzielten Bruchmomente aus der 3-Punkt-Biegung liegen. Die Anwendung der 3-Punkt-Biegeprüfung führt zu systematischen Überschätzungen der Festigkeitseigenschaften der untersuchten Sandwichplatten. Die ermittelten Differenzen liegen zwischen 12 % und 37 % und sind auf die unterschiedlichen Kräfte- und Momentenverläufe zurückzuführen.
- die entwickelten Sandwichplatten konkurrenzfähig sind und ein ähnliches Tragverhalten aufweisen wie moderne Leichtbauplatten. Gleichzeitig besteht jedoch ein Verformungsrisiko, hier machen die Ergebnisse deutlich, dass die Sandwichplatten im Durchschnitt ca. 20 % bis 26 % höhere Verformungen erreichen als herkömmliche Spanplatten. Im Allgemeinen besitzt jedoch die Tragfähigkeit bzw. die Belastungsmöglichkeit eines Plattenwerkstoffes eine deutlich höhere Bedeutung für die Verwendung als die Verformung.
- das Tragverhalten einer Sandwichverbundplatte von verschiedenen Faktoren abhängig ist, insbesondere von der Plattendicke des Verbundes. Die Untersuchungen zeigen, dass eine steigende Plattendicke sich positiv auf das Tragverhalten der Sandwichplatten auswirkt. Eine Erhöhung der Plattendicke hat eine Verbesserung des Widerstandsmoments und damit einhergehend eine Erhöhung der Bruchmomente zur Folge.

5.2.3 Bestimmung des Schraubenausziehwiderstandes

Der Schraubenausziehwiderstand eines Werkstoffes ist für dessen Verarbeitung im Möbelbereich von großer Bedeutung und wird nach DIN EN 320 ermittelt. Mit Hilfe dieses Wertes kann beurteilt werden, inwieweit das Haltevermögen von Schrauben beispielsweise zur Verbindung verschiedener Bauteile ausreichend ist. Hierzu werden die popcornbasierten Sandwichverbundplatten mit diversen Deckschichtmaterialien (hergestellt nach dem Einschritt- bzw. Zweischritt-Verfahren) (vgl. Kap. 3.4.2) sowohl hinsichtlich der Auszugswiderstände an den Seitenkanten als auch an den Oberflächen geprüft (vgl. Kap. 3.3.3). Die Prüfungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Auszugsrichtungen der Schrauben. So liegen die ermittelten Werte für Schrauben senkrecht zur Oberfläche je nach Decklagenmaterial deutlich über dem Haltevermögen der Seitenkanten.

In Abbildung 37 sind die ermittelten Ergebnisse für die nach dem Einschritt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten mit Deckschichten aus Fasermaterial und Gewichtsanteilen von 40 %, 50 % bzw. 60 % (vgl. Kap. 3.4.2) dargestellt und die charakteristischen Unterschiede zwischen den Festigkeiten beider Auszugsrichtungen (Oberfläche bzw. Seitenflächen des Prüfkörpers) werden erkennbar.

So kann der Abbildung 37 entnommen werden, dass alle Sandwichverbundplatten ähnliche Auszugswerte aus den Seitenkanten aufzeigen. Die Werte liegen hier zwischen ca. 325 N bis 350 N und entsprechen den Werten einer reinen Popcornverbundplatte mit einer Rohdichte von 300 kg/m^3 . Die Auszugswerte aus den Seitenflächen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass mit steigendem Faseranteil in den Deckschichten die Auszugswiderstände aus den Oberflächen der Sandwichverbundplatten signifikant steigen. Hierbei handelt es sich um höchst signifikante Mittelwertsunterschiede. Die Auswertung zeigt eine positive Korrelation mit 0,95 (nach Spearman) zwischen Schraubenthaltevermögen der Platten und den Deckschichtdicken bzw. Faseranteilen in den Deckschichten. Bereits aus der Literatur ist bekannt, dass die eingesetzten Deckschichten von Sandwichplatten oder anderen Holzwerkstoffen einen enormen Einfluss auf das Haltevermögen von Schrauben haben. So berichten CELEBI und KILIC (2007), dass der Schraubenausziehwiderstand mit steigender Rohdichte der eingesetzten holzbasierten Deckschichten signifikant zunimmt.

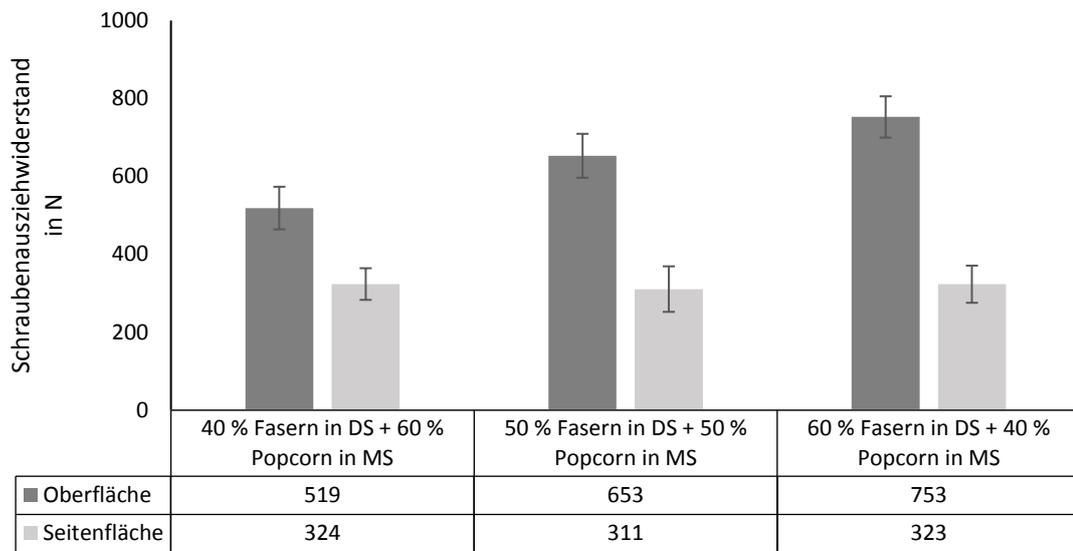


Abbildung 37: Schraubenauszieh-widerstand aus der Oberfläche und den Seitenflächen der im Einschnitt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten (Rohdichte 300 kg/m³; Dicke 20 mm).

Weiter zeigt sich, dass mit 50 % Faseranteil in den Deckschichten ein Kraftmaximum von ca. 650 N (32,5 N/mm) erreicht wird. Hiermit wird der nach Norm EN 622-3 für mitteldichte Faserplatten geforderte Minimalwert von 30 N/mm für das Schraubenthaltevermögen erfüllt und sogar übertroffen. Eine Erhöhung des Faseranteils auf 60 % bewirkt einen signifikanten Anstieg des Schraubenauszieh-widerstandes um 15 % auf etwa 753 N (37,6 N/mm). Mit einer Erhöhung des Deckschichtanteils von 40 % auf 50 % bzw. 60 % steigen die Rohdichten innerhalb der Deckschichten an und das zusätzliche Material bewirkt eine Erhöhung der Deckschichtdicken. Durch die Veränderung der beiden Faktoren Rohdichte und Deckschichtdicke kann die Verbesserung des Schraubenauszieh-widerstandes begründet werden. Die Untersuchungen von SHALBAFAN (2013) an polystyrolbasierten Sandwichplatten, mit unterschiedlich dick ausgeprägten Deckschichten aus Holzspänen, geben auch einen direkten Zusammenhang zwischen Deckschichtdicke von Sandwichplatten und Schraubenthaltevermögen an. Die polystyrolbasierten Sandwichplatten mit Deckschichtdicken zwischen 3 mm und 5 mm aus Spanmaterial erreichen Festigkeiten zwischen 385 N und 630 N bei anvisierten Rohdichten von 320 kg/m³ bzw. 460 kg/m³.

Nach dem Einschnitt-Verfahren werden ebenfalls Sandwichplatten in einer Rohdichte von 400 kg/m³ gefertigt und auf das Schraubenthaltevermögen hin getestet. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Rohdichte eine positive Wirkung auf die Biegeeigenschaften hat (vgl. Kap. 5.2.2.1.1, Abb. 29), aber eine Steigerung der Auszugwiderstände nicht erreicht werden kann. Die ermittelten Werte liegen lediglich um 3 % bis 5 % höher als die Auszugswerte der Sandwichplatten mit einer Dichte von 300 kg/m³. Eine Erhöhung der Sandwichplattenroh-dichte

führt zu einer leichten Verbesserung der Festigkeiten, jedoch handelt es sich hierbei nicht um signifikante Mittelwertsunterschiede. Durch die Erhöhung der Gesamtrohdichte der Sandwichplatten kann die Dichte im Inneren des Verbundes erhöht werden, dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die Auszugfestigkeit aus den Seitenflächen. In diesem Fall kann eine Korrelation zwischen der Dichte im Platteninneren und den Festigkeitseigenschaften aus den Seitenflächen, die nach GIBSON und ASHBY (1997) an schaubasierten Sandwichplatten ermittelt wurden, nicht bestätigt werden.

Neben den Sandwichplatten aus dem Einschritt-Verfahren werden auch die Platten geprüft, die mittels Zweischritt-Verfahren gefertigt wurden (vgl. Kap. 3.4.2). Aus Abbildung 38 geht hervor, dass, wie bereits beim Einschritt-Verfahren, die Materialien mit denen die Sandwichplatten beplankt werden einen enormen Einfluss auf die Auszugfestigkeit haben. So werden bspw. die höchsten Werte an den Sandwichverbundplatten mit einer Aluminiumbeschichtung (0,8 mm) mit ca. 1.180 N (56,0 N/mm) bzw. an Buchen-Sperrholz beschichteten Platten mit 980 N (38,0 N/mm) erzielt. Unter Verwendung von Buchen-Sperrholz und Aluminium werden oberflächenseitig Festigkeiten erreicht, die üblicherweise in der Möbelindustrie gefordert werden. Neben der Dicke und der Rohdichte des Beschichtungsmaterials wird der Schraubenauszieh Widerstand zusätzlich vom E-Modul der Beschichtung beeinflusst. So führt eine Beplankung mit 3,0 mm Buchen-Sperrholz (E-Modul: 11,0 kN/mm²) zu einem Schraubenthaltevermögen von 980 N, während der Schraubenauszieh Widerstand für Dünns spanplatte (ebenfalls 3,0 mm) mit einem E-Modul von ca. 4,0 kN/mm² lediglich 630 N beträgt.

Auch die trotz der geringen Materialstärke erzielten hohen Auszugfestigkeiten der aluminiumbeschichteten Sandwichplatten lassen sich mit einem im Vergleich zu Holzwerkstoffen hohen E-Modul von ca. 70 kN/mm² erklären (OSTERMANN, 2014). Dies gilt ebenso für die Sandwichplatten mit HPL-Beschichtungen, die trotz ihrer geringen Dicken von 0,5 mm den Beschichtungen aus Dünns panplatten bzw. Dünns-MDFs in Bezug auf den Schraubenauszieh Widerstand ebenbürtig sind und ebenfalls den Normwert nach EN 622-3 mit 30 N/mm erreichen.

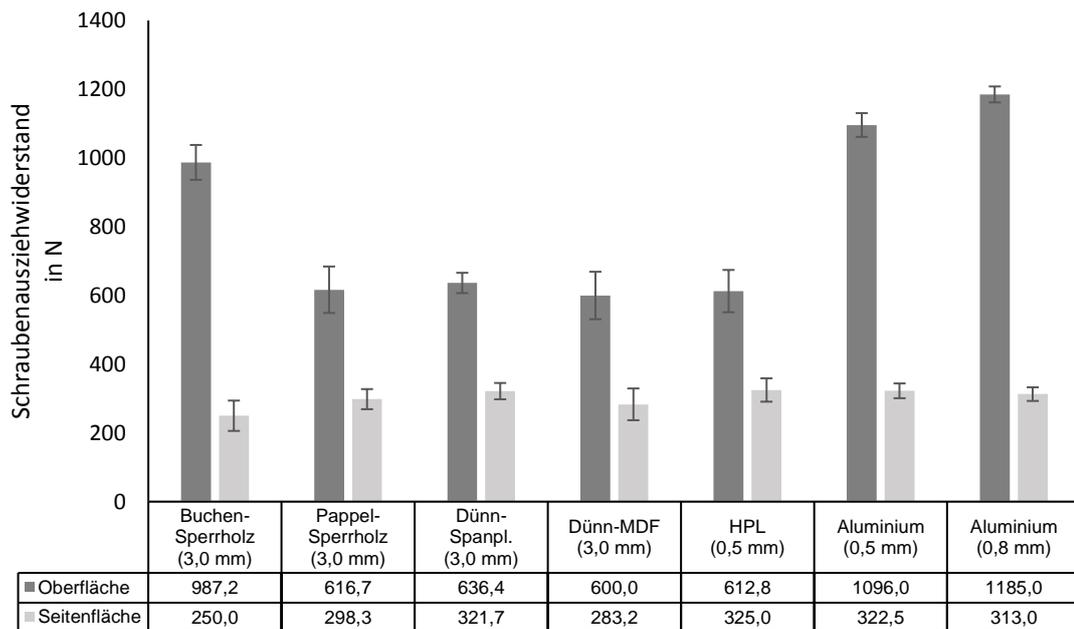


Abbildung 38: Schraubenausziehstand aus der Oberfläche und den Seitenflächen der im Zweischritt-Verfahren hergestellten Sandwichplatten (Popcornverbundplatte 300 kg/m^3 ; Dicke 20 mm).

Zur besseren Einordnung und Evaluierung der ermittelten Schraubenausziehstände der Sandwichplatten nach dem Einschritt- bzw. Zweischritt-Verfahren werden zudem herkömmliche und bereits auf dem Markt etablierte Holzwerkstoffe, wie sie bereits in Kap. 5.2.2.1.2 herangezogen werden, untersucht. In Abbildung 39 sind die ermittelten Schraubenausziehstände, die nur als Orientierung gedacht sind, dargestellt. Es zeigt sich, dass Tischlerplatten die besten Eigenschaften hinsichtlich des Haltevermögens von Schrauben aufweisen. Diese Platten weisen im Inneren einen homogenen Kern aus Albasiaholz auf und sind beidseitig mit Sperrholz beschichtet. Dieser Plattenaufbau ermöglicht es die Schraube über die eingedrehte Länge zu stabilisieren und somit ein Herausziehen der Schraube deutlich zu erschweren. Die Prüfungen zeigen, dass es zwischen dem Schraubenthaltevermögen von BalanceBoards und gewöhnlichen Spanplatten keine nennenswerten Unterschiede gibt. Die Rohdichtereduzierung innerhalb der Mittellage des BalanceBoards wirkt sich somit nicht negativ auf den Schraubenauszug aus und die Ergebnisse bestätigen zudem, dass auch bei Spanplatten die Deckschichten mit ihren Eigenschaften den Schraubenauszugswert aus den Oberflächen im Wesentlichen bestimmen.

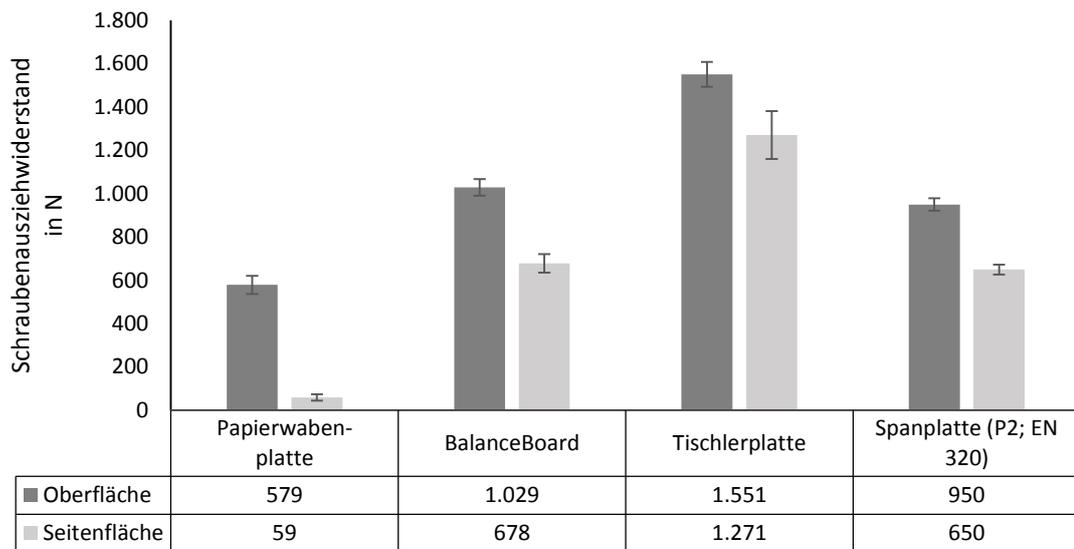


Abbildung 39: Schraubenausziehstand aus Oberfläche und Seitenfläche von ausgewählten Industriepplatten: Papierwabenplatte, BalanceBoard, Tischlerplatte und Spanplatte.

Die untersuchten Papierwabenplatten erzielen die niedrigsten Schraubenausziehwerte mit etwa 600 N aus der Oberfläche. Diese Werte können damit begründet werden, dass nur die dünnen Deckschichten (i. d. R. Sperrholz) die Schrauben in den Platten halten und von den Papierwaben keine weitere Stabilisierung ausgeht.

Zusammenfassend zeigt dieser Versuchsabschnitt, dass

- die popcornbasierten Sandwichplatten bei Auswahl der passenden Deckschichtparameter in der Lage sind die geforderten Schraubenauszieherte nach EN 622-3 zu erfüllen und Auszugswerte erreicht werden, die mit gängigen Leichtbauplatten vergleichbar sind.
- das erreichte Schraubenhaltevermögen – unabhängig vom Herstellungsverfahren – sehr stark variiert und eine starke Abhängigkeit von den Deckschichten zeigt. Durch eine Variierung der Deckschichteigenschaften kann der Schraubenausziehewiderstand einem zukünftigen Anwendungszweck entsprechend angepasst werden. Hierdurch kann eine Optimierung der Platten herbeigeführt werden und eine Überdimensionierung, bspw. durch einen zu hohen Rohstoffeinsatz in den Deckschichten, kann vermieden werden.
- der Schwachpunkt der popcornbasierten Sandwichplatte, wie bspw. auch bei Papierwabenplatten, das Haltevermögen aus den Seitenkanten der Platten ist.

5.2.4 Mechanische und physikalische Eigenschaften der im Industriemaßstab hergestellten Sandwichplatten

Im Zuge eines Industrierversuches wird geprüft, ob die Herstellung von popcornbasierten Sandwichplatten auf bereits vorhandene Industrieanlagen, ohne große Umbaumaßnahmen zu tätigen, möglich ist. Innerhalb dieses Versuches werden Popcornverbundplatten und HPL- bzw. Dünn-MDF-beschichtete Sandwichverbundplatten gefertigt. Die Rohdichte der Verbundplatten beträgt in etwa 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 (vgl. Kap. 3.5.1) und die Dicke liegt bei 20 mm. Zur Herstellung der Platten werden die Pressparameter sowie die Rezepturen für die Beileimung in Anlehnung an die erzielten Ergebnisse der im Labormaßstab gefertigten Sandwichplatten gewählt. Hierzu werden eine Presstemperatur von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine Durchlaufgeschwindigkeit von $0,6 \text{ m/min}$ gewählt. Durch diese Parameter wird sichergestellt, dass nach dem Passieren der Heizzone eine Temperatur von min. $103 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Mittellage der Platte erreicht wird, sodass das eingesetzte Bindemittel korrekt aushärten kann. Als gewähltes Bindemittel kommt der UF-Harz Kaurit 350 zum Einsatz (8 % auf atro Popcorn). Die hergestellten Verbund- bzw. Sandwichplatten werden hinsichtlich der physikalisch- technologischen Eigenschaften untersucht und evaluiert. Hierzu werden die Querkzugfestigkeiten sowie die Biegefestigkeiten der Platten bestimmt. Auf Grund der geringen Plattenanzahl werden die Ergebnisse des Industrierversuches nicht statistisch ausgewertet.

5.2.4.1 Bestimmung der Querkzugfestigkeit

Die hergestellten Popcornverbundplatten mit einer Zielrohichte von 200 kg/m^3 bzw. 300 kg/m^3 weisen Querkzugfestigkeiten von $0,15 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,19 \text{ N/mm}^2$ auf. Die im industriellen Maßstab hergestellten Platten weisen im Vergleich zu den im Labormaßstab entwickelten Platten mit durchschnittlich $0,20 \text{ N/mm}^2$ bis $0,30 \text{ N/mm}^2$ (Rohichte zwischen 200 kg/m^3 und 300 kg/m^3) deutlich niedrigere Festigkeitswerte auf (vgl. Kap. 5.2.1.4 Versuchsreihe III; vgl. Tab. 28).

Eine mögliche Erklärung für die geringer ausfallenden Querkzugfestigkeiten ist, dass sich die Verbundplatten zu lange innerhalb der Presse befunden haben und somit die Hitzetoleranz überschritten wurde. Durch die andauernde Hitzeeinwirkung ist das Material versprödet und die Struktur wird negativ beeinflusst, wodurch die Festigkeit des Verbundes herabgesetzt wird. Das heißt, dass die Abstimmung der Heizzone und die Durchlaufgeschwindigkeit optimiert werden müssen.

Tabelle 28: Vergleich der erzielten Querzugfestigkeiten der im Labormaßstab bzw. Industriemaßstab hergestellten Popcornverbund- bzw. Sandwichverbundplatten

Plattenvariante	Rohdichte Verbundplatte in kg/m ³	Labormaßstab Querzugfestigkeit in N/mm ²	Industriemaßstab Querzugfestigkeit in N/mm ²
Popcornverbund	200	0,20	0,15
	300	0,30	0,19
Sandwichplatte mit DS aus HPL	200	-	0,08
	300	-	0,14
Sandwichplatte mit DS aus Dünn-MDF	200	-	0,19
	300	-	0,25

Die untersuchten Prüfkörper der Sandwichplatten mit einer Beschichtung aus HPL erzielen Querzugfestigkeiten zwischen 0,08 N/mm² und 0,12 N/mm² bei einer durchschnittlichen Rohdichte von 350 kg/m³, wobei die Rohdichte des Popcornverbundes 200 kg/m³ beträgt. Bei der Untersuchung zeigt sich, dass die Prüfkörper gegenüber einer einwirkenden Kraft immer in der Deckschicht und nicht im Popcornverbund nachgeben. Folglich ist der Schwachpunkt des Verbundes nicht wie üblich die Popcornplatte mit der niedrigen Rohdichte, sondern die Beschichtung aus HPL. Beobachtungen zeigen, dass aufgrund der hohen Hitzeeinwirkung von außen Blasen innerhalb des HPL-Materials entstehen und die Decksichten beulen. Weiter kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass sich das MDI als Verbindungsmittel zwischen Deck- und Popcornverbund eignet. Da die untersuchten Prüfkörper nicht zwischen Deckschicht und Mittellage gerissen sind, kann vermutet werden, dass das MDI eine gute Verbindung mit dem Popcornmaterial und der Deckschicht ausbildet. Um diese Art des Sandwichverbundes zu optimieren, müsste geprüft werden, ob ein höherwertiges HPL weniger empfindlich gegenüber Hitze ist.

Die mit Dünn-MDF beschichteten Platten erzielen Querzugfestigkeiten zwischen 0,19 N/mm² und 0,24 N/mm². Diese Werte liegen im Bereich der Querzugfestigkeiten von reinen Popcornverbundplatten hergestellt im Labormaßstab (vgl. 5.2.1.4, Versuchsreihe III). Trotz einer beobachteten Versprödung des Popcornmaterials, hat bei dieser Variante die lange Hitzeeinwirkung keinen so starken Effekt auf den Zusammenhalt des Gesamtverbundes. Dies liegt vermutlich vorrangig daran, dass die Hitze auf Grund der 3,0 mm starken MDFs nur abgeschwächt auf die Popcornstruktur trifft und somit einer Versprödung des Materials entgegengewirkt wird. Des Weiteren kann an einigen Prüfkörpern ein Versagen zwischen Deckschicht und Popcornverbund registriert werden. Folglich hat hier die Verbindung – bestehend aus MDI – der Belastung nicht standhalten können. Als mögliche Ursache kann ein unregelmäßiges Auftragen

des Bindemittels auf das Deckschichtmaterial vermutet werden, da bei den übrigen Prüfkörpern die Verbindung ausreichend war.

5.2.4.2 Bestimmung der Biegefestigkeit

Die Belastungsmöglichkeiten der im Industriemaßstab hergestellten Platten sind mit Hilfe der erzielten Bruchmomente in der folgenden Tabelle 29 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sandwichplatten mit einer Beschichtung aus HPL bzw. Dünn-MDF durchschnittliche Bruchmomente zwischen 29.000 Nmm und ca. 47.000 Nmm aufweisen. Wobei die HPL-beschichteten Platten deutlich niedrigere Festigkeitswerte realisieren als die MDF-beschichteten Verbunde.

Tabelle 29: Ermittelte Bruchmomente sowie Querzugfestigkeiten der im Industriemaßstab hergestellten Popcornverbund- bzw. Sandwichverbundplatten; DS = Deckschicht

Sandwichverbundplatte	Rohdichte Verbundplatte in kg/m ³	Bruchmoment in Nmm	Querzugfestigkeit in N/mm ²
Popcornverbundplatte	200	-	0,15
	300	-	0,19
Sandwichverbundplatten mit DS aus HPL	200	29.360	0,08
	300	32.140	0,14
Sandwichverbundplatte mit DS aus Dünn-MDF	200	41.680	0,19
	300	47.420	0,25

Bei einer vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse aus dem Industrieversuch mit den bisher erzielten Ergebnissen im Labormaßstab fällt auf, dass die ermittelten Biegeeigenschaften an Platten aus dem industriellen Maßstab deutlich niedriger ausfallen (vgl. Kap. 5.2.2.1.2, Versuchsreihe VIII). So erzielen die Sandwichplatten aus dem Industrieversuch mit einer Beschichtung aus Dünn-MDF bzw. HPL Bruchmomente, die um ca. 30 % bzw. 40 % niedriger ausfallen im Vergleich zu den Verbundplatten aus dem Labormaßstab. Hinsichtlich der Ergebnisse der Sandwichplatten mit HPL-Beschichtung kann wie bereits im vorherigen Kapitel 5.2.4.1 auf die starke Hitzeeinwirkung und eine damit einhergehend negative strukturelle Veränderung des Beschichtungsmaterials verwiesen werden. Bei diesen Sandwichplatten kann stets ein Versagen der Deckschicht beobachtet werden, wobei innerhalb der Kernlage keinerlei Risse erkennbar sind. Bei jedem untersuchten Prüfkörper kommt es während der Biegeprüfung zu einem punktuellen Bruch auf der oberen Deckschicht.

Die mit Dünn-MDF beschichteten Sandwichverbundplatten erzielen Bruchmomente, die ca. 30 % niedriger ausfallen als die Bruchmomente von vergleichbar beschichteten Sandwichplatten aus dem Labormaßstab (vgl. 5.2.2.1.2, Versuchsreihe VIII). Vermutlich wird das Material, obwohl bei der Prüfung der Querzugfestigkeit kein Effekt festgestellt werden konnte, durch die

Hitzeinwirkung während des Pressvorganges negativ beeinflusst. So dass die während der Biegebelastung verursachten Spannungen nicht mehr vom Popcornverbund aufgenommen werden können und es folglich innerhalb des Verbundes zum Bruch kommt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Herstellung von Sandwichverbundplatten mit unterschiedlichen Deckschichtmaterialien auf einer Doppelbandpresse im Industriemaßstab möglich ist. Jedoch zeigen die Ergebnisse auch, dass noch optimierende Versuche und Untersuchungen notwendig sind, um die im Labormaßstab entwickelten Rezepturen auf den industriellen Maßstab anwenden zu können. Ein wichtiger Punkt in weiteren Untersuchungen wäre die genaue Abstimmung der Pressparameter, wie bspw. Presstemperatur und Durchlaufgeschwindigkeit des Förderbandes auf den Industrieanlagen.

Zusammenfassend kann aus dem Industrieversuch festgehalten werden, dass

- die Fertigung von popcornbasierten Sandwichplatten innerhalb einer kontinuierlich laufenden Doppelbandpresse möglich ist, jedoch noch weitere Untersuchungen zur Verbesserung des Herstellungsprozesses getätigt werden müssen.
- die Pressbedingungen (Presstemperatur, Durchlaufgeschwindigkeit, Pressdruck, etc.) noch nicht auf das Popcornmaterial bzw. die unterschiedlichen Deckschichtmaterialien abgestimmt sind.
- die im Industriemaßstab gefertigten Verbundplatten immer niedrigere Festigkeiten aufweisen als Platten die im Labormaßstab gefertigt werden. So zeigt das Material nach dem Pressvorgang Versprödungserscheinungen.

6 Zusammenfassung

Die Verknappung des Rohstoffes Holz, die Zuspitzung der Konkurrenzsituation zwischen energetischer und stofflicher Nutzung nachwachsender Rohstoffe und zusätzlich das sich ändernde Bewusstsein innerhalb der Möbelbranche leichtere und materialschonendere Produkte häufiger einzusetzen, führen dazu, dass der Universaleinsatz von Span- und Faserplatten hinterfragt wird.

In den letzten Jahren haben sich vermehrt leichte Verbundwerkstoffe auf dem Markt etabliert, hierzu zählt unter anderem das leichte BalanceBoard der Firma Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH. Hierbei handelt es sich um eine leichte Spanplatte in deren Platteninneren Mittelschichtspäne durch expandiertes Stärkegranulat substituiert werden.

Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurde auf die Plattenentwicklung des BalanceBoards mit der Entwicklung einer noch leichteren, auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Sandwichplatte aufgebaut. Hierzu sollte geprüft werden, ob die Entwicklung einer solchen Sandwichplatte, die aus einer leichten Verbundplatte aus Popcorngranulat und Bindemittel sowie zwei steifen Deckschichten besteht, möglich ist.

Das Hauptziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Rezeptur und eines Herstellungsprozesses zur Fertigung von Popcornverbundplatten, die anschließend mit Beschichtungen beplankt wurden. Diese Popcornverbund- sowie Sandwichverbundplatten wurden anschließend hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht und beurteilt. Zur Herstellung der Sandwichplatten wurden zuerst Popcornverbundplatten mit unterschiedlichen Popcornmaterialien, Bindemittelrezepturen und Herstellungsparametern hergestellt und anhand der ermittelten Querkzugfestigkeiten beurteilt. Die aus diesen Versuchen hervorgehende optimierte Verbundplatte wurde zur weiteren Entwicklung der Sandwichplatten herangezogen. Zur Entwicklung dieser wurden zwei unterschiedliche Herstellungsverfahren, das Einschritt- bzw. das Zweischritt-Verfahren, angewendet. Bei dem Einschritt-Verfahren wurden das Popcorn und die Deckschichtmaterialien beleimt und anschließend getrennt nacheinander gestreut und zu einer Platte verpresst. Das Zweischritt-Verfahren zeichnete sich dadurch aus, dass zuerst die Popcornverbundplatte hergestellt wurde und erst in einem zweiten Schritt die Beplankung mit Deckschichtmaterialien erfolgte.

In einem ersten Schritt wurden die eingesetzten Materialien mit Hilfe chemische-physikalischer Analysen umfassend untersucht, hierzu wurden neben dem Popcorn auch Mais und zu Vergleichszwecken Holzspäne herangezogen. Aus den Ergebnissen der chemisch-physikalischen Analysen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Untersuchung der Schüttdichte des eingesetzten Popcorngranulats zeigte, dass diese mit ca. 46 kg/m^3 bis 64 kg/m^3 deutlich unterhalb der Schüttdichte von Holzspänen liegt. Weiterhin ist die Schüttdichte niedrig genug, um einen Plattenwerkstoff mit niedrigen Rohdichten zu realisieren. Eine weitere Analyse des Granulats zeigte, dass eine Separierung des Popcornmaterials vom Staubanteil sowie von nicht aufgepufften Maispartikeln notwendig ist, um so die anvisierten niedrigen Rohdichten realisieren zu können und um die Plattenqualität zu gewährleisten.
- Die Analyse des Proteingehalts im Popcorngranulat bzw. im Mais zeigte, dass die Umwandlung von Mais zu Popcorn den Proteinanteil von ca. 8 % bis 10 % nicht wesentlich verändert. Des Weiteren ging aus den Analysen hervor, dass das Popcorngranulat die Fähigkeit besitzt Formaldehyd ab Temperaturen von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ zu binden und somit als Formaldehydfänger während der Plattenherstellung zu fungieren. Bei Raumtemperatur wird jedoch kein Formaldehyd gebunden.
- Ähnlich wie Holz und Holzwerkstoffe nehmen auch Popcorngranulat und Popcornverbundplatten Feuchtigkeit auf. Wechselnde relative Luftfeuchtigkeiten führen zu Ad- und Desorption bei den untersuchten Materialien und zusätzlich stellte sich ein leichter 1 %-iger Hysterese-Effekt ein. Aus den Untersuchungen zur Dimensionsstabilität bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und Temperaturen ging hervor, dass der Einfluss dieser Parameter auf die Verbundplatten sehr groß ist. Ab einer relativen Feuchte von 80 % bis 82 % und einer Temperatur von ca. $25 \text{ }^\circ\text{C}$ konnten starke Dimensionsveränderungen an den Verbundplatten beobachtet werden. Bei den Verbundplatten begann ein Schrumpfprozess. Dieser Prozess könnte durch eine Ummantelung durch Polyurethan bzw. Epoxid-Harz sowie durch das Einbringen von Hydrophobierungsmitteln in das Bindemittelsystem deutlich reduziert bzw. unterbunden werden.

Im zweiten Teil dieser Forschungsarbeit wurden die popcornbasierten Verbundplatten hergestellt und auf ihre mechanisch-technologischen Eigenschaften hin untersucht. Hierzu wurden in Versuchsreihen ausgewählte Parameter wie variierende Pressparameter, unterschiedliche Bindemittelsysteme und Bindemittelanteile sowie verschiedene Rohdichten näher betrachtet, um den Einfluss dieser Faktoren auf die Platteneigenschaften einschätzen zu können.

- Die Untersuchungen machten deutlich, dass die Eigenschaften der Popcornverbundplatten von verschiedenen Faktoren abhängen, hierzu zählen unter anderem Ausgangsmaterial, Pressparameter, Bindemittelwahl sowie Rohdichte.
Zur Herstellung der Popcornverbundplatten waren eine Presstemperatur von 180 °C und ein Presszeitfaktor von 10,5 s/mm notwendig, darüber hinaus ergaben die Untersuchungen, dass harnstoffformaldehydbasierte Harze für die Plattenherstellung verwendet werden können. Allgemein war die Herstellung der Popcornplatten mit dem Verfahren der Spanplattenherstellung vergleichbar. Die Untersuchungen der Verbundplatten, die mit unterschiedlich fraktioniertem Popcornmaterial hergestellt wurden, ergaben, dass eine Fraktionierung die Querkzugfestigkeit nicht positiv verbessert. Das Material wurde daher nur von Staub und Grobpartikeln befreit, es fand keine Separierung in Fraktionsgrößen statt. Des Weiteren zeigten die Verbundplatten eine starke Abhängigkeit zwischen Rohdichte und Querkzugfestigkeit. Allgemein kann festgehalten werden, dass die Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Rohdichte kontinuierlich steigt. Innerhalb des Rohdichtebereiches 100 kg/m³ bis 300 kg/m³ steigt die Querkzugfestigkeit logarithmisch von 0,07 N/mm² auf 0,30 N/mm² an. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt war die Optimierung der Popcornverbundplatten hinsichtlich des eingesetzten Bindemittels, hierzu wurden UF-Harze (K 350 bzw. K 340) in verschiedenen Anteilen sowie Bindemittelmischungen mit MDI untersucht. Durch Variierung der Bindemittelanteile von 4 % auf 6 % bzw. 8 % UF-Harz auf atro Popcornmaterial nehmen die Querkzugfestigkeiten mit abnehmendem Beleimungsgrad ab, wobei die höchsten Festigkeiten mit einer 8 %-igen Beleimung erzielt wurden. Ein auf MDI basiertes Bindemittel verbesserte im Vergleich zu UF-Harz die Platteneigenschaften nicht.
- Neben den mechanischen Eigenschaften der popcornbasierten Verbundplatten wurden auch deren Formaldehydemissionswerte beurteilt. Die Untersuchung der Formaldehydemissionen mittels der Kammermethode (EN 717-1) zeigte, dass die Popcornplatten nur sehr geringe Formaldehydemissionen besitzen. Der Grenzwert E1 mit 0,1 ppm wurde immer unterboten und bei Verwendung eines formaldehydreduzierten Bindemittels (K 340) konnte sogar der Grenzwert 0,065 ppm der EPF (European Panel Federation) bzw. die japanische Emissionsklasse F*** mit 0,04 ppm eingehalten werden. Auf Grund der reduzierten Rohdichte und des geringen Bindemittelanteils sowie der guten Presseigenschaften des Popcornmaterials konnte der Formaldehyd nicht durch den Plattenwerkstoff nach außen diffundieren. In weiterführenden Untersuchungen wurde der Einfluss der relativen Luftfeuchte und der Temperatur auf die Formaldehydemissionen geprüft und es zeigte sich, dass die Abgabewerte stark von den Parametern Temperatur

und rel. Luftfeuchte beeinflusst wurden. Allgemein wurde die Formaldehydabgabe durch Erhöhung dieser Faktoren gesteigert.

Nach der erfolgreichen Bestimmung der Pressparameter sowie Bindemittelrezepturen zur Herstellung einer popcornbasierten Verbundplatte mit ausreichenden Festigkeitseigenschaften wurden mit Hilfe dieser Parameter popcornbasierte Sandwichplatten hergestellt.

- Im Einschnitt-Verfahren wurden Sandwichplatten mit Deckschichten aus Fasermaterial (40 % Deckschichtanteil) hergestellt, die bereits mit Rohdichten von 400 kg/m^3 und Plattendicken von 20 mm bzw. 30 mm Biegeeigenschaften aufwiesen, die mit herkömmlichen Spanplatten (Rohdichte 650 kg/m^3) vergleichbar waren. Mit Erhöhung des Deckschichtanteils auf $\geq 50 \%$ war eine Reduzierung der Rohdichte auf bis zu 300 kg/m^3 möglich ohne hiermit die Biegeeigenschaften negativ zu beeinflussen.
- Neben den gefertigten Sandwichplatten im Einschnitt-Verfahren wurden auch Popcornverbundplatten im Zweischritt-Verfahren mit den Deckschichten Sperrholz, Aluminium, HPL (High Pressure Laminate), etc. hergestellt und evaluiert. Die Sandwichplatten erreichten, mit Ausnahme der Dünn-Spanplattenbeschichtung, alle Bruchmomente die oberhalb von 50.000 Nmm lagen. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse, dass die Sandwichplatten Bruchmomente aufwiesen, die auf dem Niveau der Referenzspanplatten (Innenanwendung Typ P2; Rohdichte 650 kg/m^3) lagen und im Vergleich hierzu eine ca. 45 % reduzierte Rohdichte auswiesen. Die höchsten Bruchmomente wurden mit den sperrholzbeschichteten bzw. aluminiumbeschichteten Sandwichplatten erzielt, hier lagen die Bruchmomente bei ca. 90.000 Nmm bzw. 87.000 Nmm.
- In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss der Plattendicke auf die Biegeeigenschaften der Sandwichplatten untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Tragfähigkeit einer HPL beschichteten Sandwichplatte mit Zunahme der Plattendicke von 10 mm auf 20 mm bzw. 25 mm positiv beeinflusst wurde. Eine Erhöhung der Plattendicke um 10 mm bzw. 15 mm bewirkte eine Verbesserung der Biegeeigenschaften hinsichtlich des Bruchmomentes um 82 % bzw. 134 %. Folglich führte eine steigende Plattendicke zu einem verbesserten Widerstandsmoment der Platte, wodurch wiederum das Tragverhalten positiv beeinflusst wurde. Ein verbessertes Widerstandsmoment führte dazu, dass eine Platte mit einer höheren Maximalkraft belastet werden konnte und somit ein höheres Bruchmoment realisiert wurde. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass durch eine höhere Maximalkraft stärkere Querkräfte innerhalb einer Platte hervorgerufen

werden und es somit zu einer Schubproblematik kommen kann. Des Weiteren ergaben die Untersuchungen, dass schubempfindliche Sandwichplatten eher mit der 4-Punkt- als mit der 3-Punkt-Biegungprüfung getestet und bewertet werden sollten, da hiermit speziell der Schwachpunkt – der rohdichtereduzierte und schubschwache Kern der Sandwichplatte – untersucht wird. Auf Grund des Plattenaufbaus reagierten Sandwichplatten empfindlicher auf Schub- als auf Biegeeinflüsse. Mit Hilfe der 4-Punkt-Biegeprüfung würde so eine systematische Überschätzung der Platteneigenschaften verhindert werden.

- Es hat sich gezeigt, dass die entwickelten Sandwichplatten mit Rohdichten zwischen 300 kg/m^3 und 400 kg/m^3 oft in den untersuchten Eigenschaften die Fähigkeiten konventioneller Holzwerkstoffe mit Rohdichten von $\geq 650 \text{ kg/m}^3$ besaßen. Zusätzlich wiesen die popcornbasierten Sandwichplatten Eigenschaften auf, die auf dem Niveau gängiger leichter Papierwabenplatten liegen. Mit Hilfe der 3-Punkt- und 4-Punkt-Biegeprüfung konnte herausgearbeitet werden, dass die Sandwichplatten ein Tragverhalten ähnlich dem einer herkömmlichen Spanplatte bzw. einer Papierwabenplatte aufwiesen.
- Die Untersuchung des Schraubenausziehwiderstandes zeigte, dass Sandwichplatten in Abhängigkeit der gewählten Deckschichtmaterialien in der Lage sind den geforderten Grenzwert nach EN 622-3 ($> 30 \text{ N/mm}$) zu erfüllen. Die popcornbasierten Verbundplatten erreichten Auszugswerte, die mit gängigen Leichtbauplatten vergleichbar waren. Im Zuge dieser Untersuchung wurde jedoch deutlich, dass der Schwachpunkt dieser Sandwichplatten, wie bspw. auch bei Papierwabenplatten, das Haltevermögen aus den Seitenkanten der Platten ist.

Zum Ende dieser Arbeit wurde ein Industrierversuch durchgeführt, um zu prüfen, ob eine kontinuierliche Herstellung von popcornbasierten Verbundplatten möglich ist, ohne große Umrüstungen an bereits bestehenden Maschinen durchzuführen.

- Der Versuch zeigte, dass prinzipiell eine kontinuierliche Produktion der Verbundplatten möglich ist, jedoch noch Forschungsarbeit geleistet werden muss, um die optimalen Prozessparameter zu gewinnen. Auf einer kontinuierlich laufenden Doppelbandpresse konnten Sandwichverbundplatten mit unterschiedlichen Deckschichtmaterialien gefertigt werden, doch erlangten diese Verbunde nicht die Festigkeiten wie die Platten, die im Labormaßstab entwickelt wurden. Hauptursache hierfür war eine zu hohe Temperatur bzw. zu langsame Durchlaufgeschwindigkeit während des Pressvorganges, sodass das Popcornmaterial und die Deckschichten negativ beeinflusst wurden.

7 Ausblick

Auf die Problematik der Rohstoffverknappung im Bereich der Holzwerkstoffindustrie wird seit einigen Jahren mit der verstärkten Forschung im Bereich des Leichtbaus und damit einhergehend der Entwicklung von neuartigen und leichten Plattenwerkstoffen geantwortet. Daher sollte im Zuge dieser Arbeit ein neuartiger, leichter Plattenwerkstoff mit Hilfe eines Sandwichaufbaus entwickelt werden, der auf nachwachsenden Rohstoffen basiert und mindestens die technologischen Eigenschaften aufweist wie die auf dem Markt etablierten leichten Plattenwerkstoffe. Innerhalb dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Verwendung von Popcorngranulat zur Herstellung einer leichten Verbund- sowie Sandwichverbundplatte möglich ist. Durch den Einsatz von Popcorngranulat konnte ein homogener Popcornverbund erzeugt werden, der mit Deckschichten ausgestattet zu einer Sandwichverbundplatte mit ausreichenden Biegeeigenschaften weiterverarbeitet werden konnte. Es konnte gezeigt werden, dass die mechanisch-technologischen Eigenschaften wie bspw. das Biegeverhalten unter Belastung, die Zugfestigkeit aber auch der Schraubenauszieh Widerstand mit den Eigenschaften herkömmlicher Holzwerkstoffe bzw. leichter Leichtbauplatten konkurrieren bzw. deren Eigenschaften übertreffen können.

Ein wichtiger zukünftiger Schwerpunkt für Forschungsarbeiten ist die Übertragung des Herstellungsprozesses aus dem Labor-, Technikummaßstab auf industrielle Produktionsanlagen. Zur Erforschung der Herstellungsparameter und Rezepturen müssen ausgedehnte Produktionsversuche durchgeführt werden. Hierzu sollte die Idee und das Herstellungs-konzept der popcornbasierten Sandwichplatte aufgegriffen und durch systematische Industrierversuche auf bspw. Conti-Roll-, bzw. Doppelbandpressenanlagen weiterentwickelt und verbessert werden. Der popcornbasierte Plattenwerkstoff besitzt große Attraktivität für Unternehmen, da zur industriellen Herstellung der Sandwichplatten keine neuen Maschinen bzw. große Umrüstungsinvestitionen getätigt werden müssen. Da bereits das BalanceBoard gut auf dem Markt etabliert ist und vom Kunden (Küchenhersteller) positiv angenommen wurde, stehen die Chancen gut, dass auch ein weiteres nachhaltiges, popcornbasiertes Produkt erfolgreich vermarktet werden kann.

Innerhalb dieser Untersuchungen stand die Erforschung einer biegefesten Sandwichverbundplatte für den Möbelbereich im Vordergrund. In weiteren Versuchen sollte auch eine Ausweitung des Anwendungsspektrums der Sandwichplatte vorgenommen werden. Neben der Möbelbranche spielen Leichtbauprodukte auch in anderen Bereichen eine wichtige Rolle, so kommen leichte Sandwichplatten als Konstruktionswerkstoffe auch im Automobil, Schiffsbau bzw. Ausbau von Caravans sowie im Innenausbau zum Einsatz. Der Innenausbau mit

den Bereichen: Türenbau, Wandverkleidung sowie Deckenverkleidung bietet potentielle Anwendungsfelder für die popcornbasierten Leichtbauplatten. Für eine mögliche Anwendung in diesen Bereichen muss

die Weiterverarbeitung (Oberflächen- und Stirnflächenbearbeitung) und Verbindungstechnik der Sandwichplatten intensiv untersucht werden.

Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass das Popcorngranulat bzw. die Popcornverbundplatten sehr geringe Wärmeleitfähigkeiten besitzen und ein Einsatz im Bereich des Wärmeschutzes möglich sein kann. Hierzu müssen niedrigere Rohdichten, Wärmeleitfähigkeiten sowie Wasserdampfdurchlässigkeit intensiv geprüft werden. Neben diesen Faktoren sollte auch untersucht werden, ob sich die Verbundplatten auch als Schallschutz eignen und deren Anforderungen erfüllen. Denn auf Grund des guten Tragverhaltens und bei vielleicht gegebenen schalltechnischen Qualitäten kann die Anwendung der Popcornverbundplatte als Trennwand im Messebau attraktiv sein.

8 Literaturverzeichnis

Aicher, S. (1984):

Festigkeitsuntersuchungen an platten- und scheibenbeanspruchten Sandwichelementen aus Spanplattendeckschichten und einem Polyurethan-Hartschaumkern. Dissertation, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie.

Allen, H.G. (1969):

Analysis and Design of Structural Sandwich Panels. 1. Auflage. Pergamon Press, Oxford.

Barkanov, E. (2006):

Optimal design of laser-welded sandwich modules. Schiffbau Forschung, V45 (1): 21-33.

Becker, K.; Pfau, J.; Tichelmann K. (2004):

Trockenbau Atlas: Teil 1: Grundlagen, Einsatzbereiche, Konstruktionen, Details. 3. Auflage, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln.

Belouettar, S.; Abbadi, A.; Azari, Z.; Belouettar, R.; Freres, P. (2009):

Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. Composite Structures, V87 (3): 265-273.

Bichsel, R. (o. J.):

Hydrothermal Processes Involved in Cereals Puffing. Cerex AG, Bleienbach. Internetdownload am 19.03.2016: <http://www.cerex.ch/files/hydrothermal.pdf>.

Biliaderis, C. G.; Maurice T. J.; Vose J. R. (1980):

Starch Gelatinization Phenomena Studied by Differential Scanning Calorimetry. Journal of Food Science V45 (6): 1669-1674, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim.

Blanchette, R. A.; Biggs, A. R. (1992):

Defense Mechanisms of Woody Plants Against Fungi. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

BMWi – (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2016):

Marktanreizprogramm (MPA) – Internetaufruf am 18.04.2016: <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Foerderung/Marktanreizprogramm/marktanreizprogramm.html>.

Boutard, A. (2012):

BEAUTIFUL CORN – America's Original Grain from Seed to Plate. 1. Auflage, New Society Publishers.

Briggs, D.E. (1998):

Malts and Malting. 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Brinkmann, E. (1982):

Entscheidende technologische Werte von Spanplatten und Möglichkeiten zu deren Beeinflussung während der Produktion. Holz als Roh- und Werkstoff V40 (10): 381-386, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

Brücher, H. (1982):

Die sieben Säulen der Welternährung: Herkunft, Nutzung und Zukunft unserer wichtigsten Nutzpflanzen. Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft, Frankfurt/ Main.

Buchholzer, P. (1990):

Eigenschaften UF- und PF-gebundener Pappelholzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff V48 (7): 274-274, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

BWI-3 – (Bundeswaldinventur 3) (2014):

Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Casari, P.; Cartie, D.; Davies, P. (2005):

Characterisation of novel K-cor sandwich structures. In: Thomsen, O. T.; Bozhevolnaya, A.; Lyckegaard, A.: Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials. Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29–31 August 2005, Springer.

Celebi, G.; Kilic, M. (2007):

Nail and screw withdrawal strength of laminated veneer lumber made up hardwood and softwood layers. Construction and Building Materials V21 (4): 894-900.

Clad, W. (1982):

Die Rohdichtesenkung bei Spanplatten - Eine Literaturübersicht. European Journal of Wood and Wood Products V40 (10): 387-393, Springer-Verlag.

Cortez, A.; Wild-Altamirano, C. (1972):

Contributions to the limetreated corn flour technology. In R. Bressani; J.E. Braham; M. Behar: Nutritional improvement of maize. INCAP Pub. L4, p. 99-106, Guatemala, INCAP.

Cowling, E. B.; Merrill, W. (1966):

Nitrogen in wood and its role in wood deterioration. Canadian Journal of Botany V44 (11): 1533-1544, NRC Research Press.

Davis, J. M. (2001):

Lightweight Sandwich Construction, 1. Auflage, Wiley-Blackwell Science.

De Pinho Ferreira Guine, R.; dos Reis Correia, P. M. (2014):

Engineering Aspects of Cereal and Cereal-Based Products. Contemporary Food Engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Delcour, J. A.; Hosney, R. C. (2010):

Principles of Cereal Science and Technology. 3. Auflage, American Association of Cereal Chemists.

Deppe, H.-J. (1968):

Holzspan-Schaumstoff-Verbundplatten für das Bauwesen. Holz-Zentralblatt(86): 1249-1253, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen.

Deppe, H.-J.; Ernst, K. (2000):

Taschenbuch der Spanplattentechnik. 4. Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen.

DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (1994):

Richtlinie über die Klassifizierung und Überwachung von Holzwerkstoffplatten bezüglich der Formaldehydabgabe (DIBt-Richtlinie 100).

Dix, B. (2014)

Formaldehydarme Holzwerkstoffe mit Aminoplastharzen als Bindemittel. Teil 1: Holzwerkstoffe mit formaldehydarmen UF-Harzen als Bindemittel und Harnstoff sowie Tannin als Formaldehydfänger. Holztechnologie V55 (2): 11-17.

Dix, B. (2015):

Reducing formaldehyde emission from wood-based materials. Internetaufruf am 18.04.2016 http://www.wki.fraunhofer.de/en/services/vst/projects/reducing-HCHO-wood-based_materials.html.

Dix, B.; Börner, F. (2013):

Formaldehydfreie Melamin Leimharze für Holzwerkstoffe. Tagungsbandbeitrag. In: Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) gGmbH (Hrsg.): 10. Holzwerkstoffkolloquium 2013. Innovationen Binden – Wert statt Wachstum. 12.- 13. Dezember 2013, Dresden.

Dix, B.; Marutzky, R. (1984):

Verleimung von Spanplatten mit Tannin-Formaldehydharzen aus dem Rindenextrakt von *Pinus radiata*. Holz als Roh- und Werkstoff V42 (6): 209-217, Springer-Verlag.

DMK – (deutsches Maiskomitee) (2015):

Internetaufruf am 15.04.2016:
<http://www.maiskomitee.de/web/public/Fakten.aspx/Statistik>.

Dunky, M. (2002):

Einflussgrößen. In: Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren, Teil III. 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

DStatis –(Statistisches Bundesamt) (2015):

Holzeinschlag 2014, Internetaufruf am 16.10.2015:
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/WaldundHolz/Aktuell.html>

Eco-Institut (2014):

Formaldehyd wird in der EU als krebserzeugend 1B und mutagen 2 eingestuft. Homepage: Kundeninfo des eco-INSTITUT, Recht, Gesundheit, Chemikalien. Internetdownload am 30.03.2016:
<http://www.eco-institut.de/startseite/detail/formaldehyd-wird-in-der-eu-als-krebserzeugend-1b-und-mutagen-2-eingestuft/>

Eierle, B.; Niedermaier, P.; Schanda, U.; Meistring, P.; Nusser, B. (2008):

„Konstruktionsgrundlagen für den Einsatz von Leichtbauelementen im Innenausbau“. Abschlussbericht des gleichnamigen Teilprojektes im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Holzbau der Zukunft“. Rosenheim/München, Fraunhofer IRB Verlag.

FAO – (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (1992):

Maize in Human Nutrition. Food and Nutrition Series No. 25. FAO, Rom.

Fathi, A., Wolff-Fabris, F.; Altstädt, V.; Gätzi, R. (2013):

An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options. Journal of Sandwich Structures and Materials V15 (5): 487–508, SAGE Publications.

FAZ – (Frankfurter Allgemeine) (2015):

Internetdownload am 18.03.2016

<http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/drei-gruende-warum-der-oelpreis-wieder-steigen-koennte-13357518.html>.

Frank, M. (2016):

Entwicklung von Popcornpressteilen für den Automobilbereich. Masterarbeit, Fachbereich Forstwissenschaften, Universität Göttingen.

Frihart, C.; Wescott, J.; Chaffee, T.; Gonner, K. (2012):

Formaldehyde Emissions from Urea-Formaldehyde and No-Added-Formaldehyde-Bonded Particleboard as Influenced by Temperature and Relative Humidity. *Forest Products Journal* V62 (7-8): 551-558.

Fleischer, O.; Marutzky, R. (2000):

Hydrolyse von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen: Auflösung des Spangefüges in Holzwerkstoffen durch hydrolytischen Abbau der Leimfuge. *Holz als Roh- und Werkstoff*, V58 (5): 295-300, Springer Verlag.

Garrett, S. D. (1970):

Pathogenic Root-Infecting Fungi. Cambridge University Press.

Gibson, L. J.; Ashby, M. F. (1997):

Cellular solids: Structure and Properties. Cambridge, New York, Cambridge University Press.

Halley, P.; Averous, L. (2014):

Starch Polymers; From Genetic Engineering to Green Applications. Elsevier Science & Technology.

Hapla, F.; Brück, F. (1997):

Zur Dimensionsstabilität einiger Tropenhölzer aus Sao Tome. *Holz als Roh- und Werkstoff* V55 (5): 326, Springer-Verlag.

Hapla, F.; Militz, H. (2008):

Verwertung und Verwendung von Buchenholz. Beiträge aus der NW-FVA, Band 3: 311-325.

Hayashi, K.; Ohmi, M.; Tominaga, H.; Fukudas, K. (2003):

Effect of board density on bending properties and dimensional stabilities of MDF-reinforced corrugated particleboard. *Journal of Wood Science* V49 (5): 398-404, Springer-Verlag.

Hibberd, J.M; Sheehy, J.E; Langdale, J.A. (2008):

Using C₄ photosynthesis to increase the yield of rice—rationale and feasibility. *Current Opinion in Plant Biology*, V11 (2): 228-231, ScienceDirect.

Himmelheber, M.; Hagen, G.; Froede, O. (1956):

Verfahren zur Herstellung von Spanplatten und Spanholzkörpern vornehmlich niedrigen spezifischen Gewichtes. D. Patentamt. Germany DE000001147745B.

Himmelheber, M.; Hagen, G. and Froede, O. (1958):

Verfahren zur Herstellung von Spanplatten und Spanholzkörpern vornehmlich niedrigen spezifischen Gewichtes. D. Patentamt, Germany.

Hungate, R.E. (1940):

Nitrogen content of sound and decayed coniferous woods and its relation to loss in weight during decay. *Botanical Gazette* V102 (2): 382-392, The University of Chicago Press.

Jobling, S. (2003):

Improving starch for food and industrial applications. *Current Opinion in Plant Biology*. V7 (2): 210-218, ScienceDirect.

Johnson, L. (2000):

Corn: The Major Cereal of the Americans. In: Kulp, K.: *Handbook of Cereal Science and Technology*. 2. Auflage, Marcel Dekker Inc.

Jung, B.; Roffael, E. (2002):

Über die Acidität einheimischer Holzarten. *Kurz Originalia, Holz als Roh- und Werkstoff*, V60 (2):154, Springer-Verlag.

Karrer, W. (1958):

Konstitution und Vorkommen der organischen Pflanzenstoffe. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart.

Kent, N. L.; Evers, A. D. (1994):

Technology of Cereals. An Introduction for Students of Food Science and Agriculture. 4. Auflage, CRC Press, Taylor & Francis Group.

Kharazipour, A.; Bohn, C. (2006):

Verwendung von Popcorn für Holz- und Verbundwerkstoffe, deutsches Patent: AKZ 102 006 047 279 A1.

Kharazipour, A.; Bohn, C. (2010):

Use of popcorn for timber and composite materials. US-Patent 2010/0112339 A1.

Kharazipour, A.; Ritter, N.; von Werder, H. K.; Bohn, C. (2011):

Entwicklung leichter dreischichtiger Spanplatten auf Basis nachwachsender Rohstoffe. *Holztechnologie* 52 (5): 11-16, Dresden.

Klauditz, W.; Buro, A. (1962):

Die Eignung von Sägespänen zur Herstellung von Holzspanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* V20 (1): 19-26, Springer-Verlag.

Klingler, R.W. (1995):

Grundlagen der Getreidetechnologie. 2. Auflage, Behr's Verlag, Hamburg.

Klein, B. (2011):

Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlage und Gestaltung. 9. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.

Kollmann, F. (1951):

Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Kollmann, F. (1966):

Holzspanwerkstoffe. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Kollmann, F.; Dosoudil, A. (1978):

Die Dimensionsstabilität von Holzspanplatten und ihre Prüfung. *Holz als Roh- und Werkstoff* V36 (11): 419-433, Springer-Verlag.

Koschade, R. (2011) :

Sandwichbauweise: Konstruktion, Systembauteile, Ökologie. *Ins. F. Int. Architektur*.

Liiri, O. (1960):

Der Pressdruck bei der Spanplattenherstellung. Holz als Roh- und Werkstoff V27 (10): 371-378, Springer-Verlag.

Link, C. (2014):

Entwicklung von emissionsarmen Spanplatten unter Beimischung von Rindenanteilen einheimischer Baumarten. Dissertation, Fachbereich Forstwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen.

Mahfuz, H.; Islam, M.; Rangari, V.; Jeelani, S. (2004):

Response of sandwich composites with nanophased cores under flexural loading. Composites Part B: Engineering V35 (6-8):543-550.

MANTAU, U. (2012):

Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Holzwerkstoffindustrie – Kapazitätsentwicklung und Holzrohstoffnutzung im Jahr 2010. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz-und Forstwirtschaft, Hamburg.

MANTAU, U. (2012b)

Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015. Universität Hamburg.

Marutzky, R. (1997):

Span- und Faserplatten – die modernen Holzwerkstoffe. Spektrum der Wissenschaft 4/1997: 89- 97, Heidelberg.

Marutzky, R. (2012):

Normative und regulatorische Entwicklungen zur Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen und anderen Bauprodukten in Deutschland und Europa. In: Internationaler Verein für Technische Holzfragen ivTH (Hrsg.), ivTH Newsletter, Ausgabe 04.

Marutzky, R.; Roffael, E. (1977):

Über die Abspaltung von Formaldehyd bei der thermischen Behandlung von Holzspänen: Teil I: Modell-Versuche. Holzforschung V31(1): 8–12, Walter de Gruyter Berlin, New York.

Matz, S. A., (1991):

Chemistry and Technology of Cereals as Food and Feed. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

May, H.-A. (1983):

Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten. Teil 4: Einflüsse der Dichteunterschiede und Rohstoffe auf die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und die Scherfestigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff V41 (7): 271-275, Springer-Verlag.

McGregor, D.; Bolt, H.; Cogliano, V.; Richter-Reichhelm, H. (2006):

Formaldehyde and glutaraldehyde and nasal cytotoxicity: Case study within the context of the 2006 IPCS Human Framework for the Analysis of a cancer mode of action for humans. Critical Reviews in Toxicology V36 (10): 821-835.

Metz B., Kersten G. F., Baart G. J., de Jong A., Meiring H., ten Hove J., van Steenbergen M. J., Hennink W. E., Crommelin D. J. and Jiskoot W. (2006):

Identification of formaldehyde-induced modifications in proteins: reactions with insulin. Bioconjugate Chemistry V17 (3), 815–822.

- Meyer, B. (1979):**
Urea-Formaldehyde Resins. Addison-Wesley Publishing Comp., London-Amsterdam.
- Myers, G. E.; Nagaoka, M. (1981):**
Emission of Formaldehyde by Particleboard: Effect of Ventilation Rate and Loading on Air Contamination Levels. Forest Products Journal V31 (7): 39-44.
- Niemz, P. (1993):**
Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinefelden-Echterdingen.
- Niemz, P. (2002):**
Eigenschaften ausgewählter Holzwerkstoffe. Teil I Grundlagen. In: Dunky, M.; Niemz, P.: Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Niemz, P.; Poblete, H. (1996):**
Untersuchungen zur Dimensionsstabilität von mitteldichten Faserplatten (MDF) und Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff V54 (2): 141-144, Springer-Verlag.
- Niemz, P.; Wagenführ, A. (2008):**
Werkstoffe aus Holz. In: Wagenführ, A.; Scholz, F. (2008): Taschenbuch der Holztechnik. 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig.
- Obataya, E.; Sugiyama, M.; Tomita, B. (2001):**
Dimensional stability of wood acetylated with acetic anhydride solution of glucose pentaacetate. Journal of Wood Science V48 (2002): 315-319, Springer-Verlag.
- Ostermann, F. (2014):**
Anwendungstechnologie Aluminium. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Owusu-Apenten, R. Q. (2002):**
Food Protein Analysis: Quantitative Effects On Processing. Food Science and Technology, 1. Auflage, CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Park, B.-D.; Kang, E.-C.; Park, S.-B. (2011):**
Empirical correlations between test methods of measuring formaldehyde emission of plywood, particleboard and medium density fiberboard. Journal of Wood Products V69 (2011): 311-316, Springer-Verlag.
- Perez, S.; Bertoft E. (2010):**
The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. Starch/ Stärke V62 (8): 389-420, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim.
- Petras, A. (1998):**
Design of Sandwich Structures. Dissertation, Robinson College, University of Cambridge.
- Pfleiderer (2015)**
Plattenwerkstoff – BalanceBoard, Fa. Pfleiderer GmbH. Internetaufruf am 12.02.2016:
<https://www.pfleiderer.com/de/content/Rohtr%C3%A4ger/BalanceBoard/89.63.75.html>
- Pizzi, A.; Lipschitz, L.; Valenzuela, J. (1994)**
Theory and Practice of the Preparation of Low Formaldehyde Emission UF Adhesives. Holzforschung V48 (3): 254-261, Walter de Gruyter Berlin, New York.

Plantema, F. J. (1966):

Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates, and Shells. London, Wiley & Sons Ltd.

Plath, L. (1966):

Bestimmung der Formaldehydabspaltung aus Spanplatten nach der Mikrodiffusionsmethode – Erste Mitteilung: Holz als Roh- und Werkstoff V24: 312-318, Springer-Verlag.

Polle, A.; Hawighorst, P.; Spellmann, H. (2008):

Innovative Holzprodukte und Holzwerkstoffe aus nachhaltig produziertem Buchen- und Küstentannenholz. In: Holztechnologie V49 (6): S. 5-6, Dresden.

Popper, R. (1974):

Die Einflüsse der Holzextraktstoffe auf das technologische Verhalten von Holz, insbesondere in Bezug auf die Verleimung. Vortragsunterlagen vom 22.02.1974, Institut für Mikrotechnologische Holzforschung der ETH-Zürich, Zürich.

Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2005):

Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz. Holz als Roh- und Werkstoff V63 (2): 135-148, Springer-Verlag.

Poppensieker, J.; Thömen, H. (2005):

Wabenplatten für den Möbelbau. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Arbeitsbericht des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Universität Hamburg.

Radović, B. (2005):

Verklebung von Laubholz im konstruktiven Holzbau. Tagungsband. Holz-Innovativ, Symposium mit Fachausstellung. Rosenheim, Deutschland, April 6-7.

Ratnayake, W.; Jackson, D. S. (2006):

Gelatinization and Solubility of Corn Starch during Heating in Excess Water: New Insights. Journal of Agricultural and Food Chemistry V54 (10): 3712-3716. American Chemical Society.

Ratnayake, W.; Jackson, D. S. (2009):

Starch gelatinization. In: Advances in Food and Nutrition Research V55: 221-268, ScienceDirect, Elsevier.

Richter, G (1997):

Stoffwechselphysiologie der Pflanzen: Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels. 6. Auflage, Thieme, Stuttgart.

Ritter, N. (2012):

Entwicklung leichter, dreischichtiger Spanplatten aus einer Kombination der nachwachsenden Rohstoffe Mais und Holz. Dissertation, Fachbereich Forstwissenschaften, Universität Göttingen.

Roffael, E. (2006):

Volatile organic compounds and formaldehyde in nature, wood and wood based panels. Holz als Roh- und Werkstoff V64 (2): 144-149, Springer-Verlag.

Roffael, E.; Miertzsch, H.; Schwarz, T. (1992):

Pufferkapazität und pH-Wert des Splintholzsaftes der Fichte. Kurz-Originalia. Holz als Roh- und Werkstoff V50 (6): 260, Springer-Verlag.

Roffael, E.; Rauch, W. (1974):

Extraktstoffe in Eiche und ihr Einfluss auf die Verleimbarkeit mit alkalischen Phenol-Formaldehydharzen. In: Holz als Roh- und Werkstoff V32 (5): 182-187, Springer-Verlag.

Roffael, E.; Schneider, A. (1983):

Versuche zur Verringerung der Dickenquellung von Spanplatten bei der Wasserlagerung und in Feuchter Luft. Holz als Roh- und Werkstoff, V 41 (6): 221, Springer-Verlag.

Roffael, E.; Behn, C.; Dix, B. (2012):

On the formaldehyde release of wood particles. European Journal of Wood Products, Brief Originals Kurzoriginalia.

Röser, M. (o. J.):

Mais Kultur-Geschichte und Entstehung. Landesausstellung Katalog des OÖ. Landesmuseum Linz. Internetdownload am 24.04.2016:
www.zobodat.at/pdf/KATOOENF_0061_0181-0188.pdf

Sandermann, W.; Rothkamm, M. (1959):

Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz als Roh- und Werkstoff, V17 (11): 433-440, Springer-Verlag.

Sandvik, (2016):

Technologie für eine nachhaltige Zukunft. Sandvik TPS. Internetdownload am 29.03.2016:
<http://www.tps-technopartner.de/deutsch/index.php?Downloads>

Sauerwein, P. (2013):

Kaskadennutzung: Verbrennen später nicht ausgeschlossen. Baustoffe aus Möbel und Holz Kongress NawRo-Kommunal, Berlin 2013.

Schmidt, O. (1994):

Holz- und Baupilze – Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen. 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

Schneider, A. (1973):

Über das Sorptionsverhalten von mit Phenol- und Harnstoffharz verleimten Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff V31 (11): 425-429, Springer-Verlag.

Schneider, K.-J (1986):

Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 7. Auflage, Werner Verlag. Köln.

Schulte, M.; Frühwald, A. (1996):

Some investigations concerning density profile, internal bonding and relating failure position of particleboard. Holz als Roh- und Werkstoff V54 (5): 289-294, Springer-Verlag.

Sellers, T.; McSween, J.R.; Nearn, W.T. (1988):

Gluing of Eastern Hardwoods: A Review. United States Department of Agriculture, Forest Service. New Orleans, Louisiana.

Shalbafan, A. (2013):

Investigation of Foam Materials to be Used in Lightweight Wood-Based Composites. Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Universität Hamburg.

Sorgatz, C. (2011):

Physikalische Charakterisierung von Überzugsmaterialien in der Lebensmittelindustrie – am Beispiel fettbasierter Coatings auf hygroskopischen kristallinen Strukturen. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München.

Stamm, K.; Witte, H. (1974):

Sandwichkonstruktionen; Berechnung, Fertigung, Ausführung. Wien, New York, Springer.

Stosch, M. (2004):

Design und Konstruktion von Leichtbaumöbeln. Vortrag zum 10. Jowat-Symposium.

Tegge, G. (2004):

Stärke und Stärkederivate. 3. Auflage, Behr's Verlag Hamburg.

VDGS – (Verband der deutschen Getreideverarbeiter und Stärkehersteller – VDGS e. V.) (2015):

Zahlen und Daten zur deutschen Stärke-Industrie. Internetaufruf am 21.11.2015:
<http://www.staerkeverband.de/html/zahlen.html>

Voltz, K.-R. (1974):

Untersuchungen über die Eigenschaften der Rinde von Fichte, Kiefer und Buche und ihre Eignung als Rohstoff für Flachpressplatten. WKI-Bericht Nr. 3.

Vos, H. (2010):

Entwicklung von leichten Holzwerkstoffen aus *Abies grandis* (Küstentanne) und *Fagus sylvatica* (Buche). Dissertation, Fachbereich Forstwissenschaften, Universität Göttingen, Cuvillier Verlag Göttingen.

Vos, H.; Kharazipour, A. (2010):

Eigenschaften von leichten, industriell hergestellten Spanplatten aus *Abies grandis*. Forst und Holz, 65 (1), S. 26-29

Wagenführ, R.; Wagenführ, A. (2008):

Anatomie des Holzes. In Wagenführ, A.; Scholz, F. (2008): Taschenbuch der Holztechnik. 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig.

Wagner, W.; Erhof, G. (1991):

Praktische Baustatik, Teil 2. 14. Auflage, Taubner Verlag, Stuttgart.

Wang, D.; Sun, X. (2001):

Low density particleboard from wheat straw and corn pith. Industrial Crops and Products V15 (1): 43–50.

Weimar, H.; Döring, P.; Mantau, U. (2012):

Standorte der Holzwirtschaft – Holzrohstoffmonitoring. Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Hamburg.

Wiedemann, J. (2006):

Leichtbau: Elemente und Konstruktion. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

Wittmann, O. (1962):

Die nachträgliche Formaldehydspaltung bei Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff V20 (6): 221-224, Springer-Verlag.

WKI – (Wilhelm-Klauditz-Institut) (2008):

Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt: Entwicklung einer extraleichten Spanplatte für den Möbelbau auf Basis von Schaumklebstoffen. Förderkennzeichen 01RI05141.

Wong, E.-D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Kawai, S. (1999):

Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. Wood Science and Technology, 33 (4): 327-340, Springer-Verlag.

Zenkert, D. (1997):

An Introduction to Sandwich Construction. 1. Auflage, Engineering Materials Advisory Services Ltd, London.

Zobel, H.F. (1988):

Starch Crystal Transformation and their Industrial Importance. Starch/ Stärke V40 (1): 1-7, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim.

9 Normenverzeichnis

EN 310 (1993):

Holzwerkstoffe – Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit. Deutsche Fassung EN 310:1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999. 6. Auflage, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 312 (2003):

Spanplatten – Anforderungen. Deutsche Fassung EN 312:2003. Deutsches Institut für Normungen e. V. 2005, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 319 (1993):

Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene. Deutsche Fassung EN 319:1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 320 (1993):

Faserplatten – Bestimmung des achsenparallelen Schraubenausziehwidestands. Deutsche Fassung EN 320: 1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 322 (1993):

Holzwerkstoffe – Bestimmung des Feuchtegehaltes. Deutsche Fassung EN 322:1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 323 (1993):

Holzwerkstoffe – Bestimmung der Rohdichte. Deutsche Fassung EN 323:1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 717-1 (2005):

Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Kammer-Methode. Deutsche Fassung EN 717-1:2005. Deutsches Institut für Normungen e. V. 2005, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 717-2 (2005):

Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 2: Formaldehydabgabe nach der Gasanalyse-Methode. Deutsche Fassung EN 717-2:2005. Deutsches Institut für Normungen e. V. 2005, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 717-3 (1996)

Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe – Teil 3: Formaldehydabgabe nach der Flaschen-Methode. Deutsche Fassung EN 717-3:1996. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1999, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 1604 (2013):

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Dimensionsstabilität bei definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen; Deutsche Fassung EN 1604:2013. Deutsches Institut für Normungen e. V. 2013, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

EN 25 663 (1993):

Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Kjeldahl-Stickstoff – Verfahren nach Aufschluß mit Selen (ISO 5663:1984). Deutsche Fassung EN 25 663:1993. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1993, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 66 165 (1987)

Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Grundlagen und Durchführung. Deutsche Fassung DIN 66 165:1987. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1987. Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 53 293 (1982):

Prüfung von Kernverbunden – Biegeversuch. Deutsche Fassung DIN 53 293: 1982. Deutsches Institut für Normungen e. V. 1993, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

10 Anhang

10.1 Erläuterungen der verwendeten Gleichungen

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Gleichungen – zur Beschreibung der 3-Punkt bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung – (vgl. Kap. 3.3.4.2 bzw. 5.2.2) näher erläutert und hergeleitet (SCHNEIDER, 1986; WAGNER und ERLHOF, 1991).

Biegespannungen einer monolithischen Platte mit Vollquerschnitt nach EN 310:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (18)$$

Tabelle 30: Grundbedingungen zur Herleitung der Biegespannungen nach EN 310 für monolithische Plattenwerkstoffe

Bruchmoment bzw. Biegemoment	Widerstandsmoment	Flächenträgheitsmoment	Abstand des Randes zur neutralen Faser
$M = \frac{F \cdot l_1}{4}$	$W = \frac{I}{z}$	$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$	$z = \frac{h}{2}$

Anhand der Gleichungen in Tabelle 30 gilt:

$$\sigma = \frac{F \cdot l_1}{4} \cdot \frac{z}{I} \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{F \cdot l_1}{4} \cdot \frac{12 \cdot h}{b \cdot h^3 \cdot 2} \quad (20)$$

Biegespannung nach EN 310 $\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l_1}{2 \cdot b \cdot h^2}$

Elastizitätsmodul einer monolithischen Platte mit Vollquerschnitt:

$$E = \frac{l_1^3 \cdot (F_1 - F_2)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad (21)$$

Tabelle 31: Grundbedingungen zur Herleitung des Elastizitätsmoduls nach EN 310 für monolithische Plattenwerkstoffe

Steifigkeit eines Plattenvollquerschnitts	Flächenträgheitsmoment	Kraftzunahme im gradlinigen Bereich	Durchbiegungszunahme in Prüfkörpermitte
$E \cdot I \cdot f = \frac{1}{48} \cdot F \cdot l_1^3$	$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$	$F = (F_2 - F_1)$	$f = (a_2 - a_1)$

Nach den Grundbedingungen aus Tabelle 31 gilt folgende Herleitung:

$$E = \frac{1}{48} * \frac{F * l_1^3}{I * f} \quad (22)$$

$$E = \frac{1}{48} * \frac{F * l_1^3 * 12}{b * h^3 * f} \quad (23)$$

E-Modul nach EN 310
$$E = \frac{1}{4} * \frac{F * l_1^3}{b * h^3 * f} = \frac{l_1^3 * (F_2 - F_1)}{4 * b * h^3 * (a_2 - a_1)} \quad (24)$$

Bruchmomente nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

Für das Bruchmoment nach DIN EN 310 bzw. DIN 53 293 gilt:

Bruchmoment nach EN 310:
$$M = \frac{F_{max} * l_1}{4} \quad (25)$$

Bruchmoment nach DIN 53 293:
$$M = \frac{F_{max} * l_1}{8} \quad (26)$$

Tabelle 32: Grundbedingungen zur Herleitung der Bruchmomente nach EN 310 für monolithische Plattenwerkstoffe sowie nach DIN 53 293 für Sandwichverbundwerkstoffe

Bruchmoment	Auflagerkraft	Kraftarm 3-Punkt-Biegung	Kraftarm 4-Punkt-Biegung
$M = P * a$	$P = \frac{F_{max}}{2}$	$a_{3-Punkt} = \frac{l}{2}$	$a_{4-Punkt} = \frac{l}{4}$

Bruchmoment nach EN 310
$$M_{3P} = \frac{F_{max}}{2} * \frac{l}{2} = \frac{F_{max} * l}{4} \quad (27)$$

Bruchmoment nach DIN 52 393
$$M_{4P} = \frac{F_{max}}{2} * \frac{l}{4} = \frac{F_{max} * l}{8} \quad (28)$$

Widerstandsmoment einer Sandwichplatte

Für das Widerstandsmoment einer Sandwichplatte gilt:

$$W \approx 2 * b * t * d_1 \quad (29)$$

Tabelle 33: Grundbedingungen zur Herleitung des Widerstandsmoments einer Sandwichplatte

Widerstandsmoment	Eigenträgheitsmoment Kern	Eigenträgheitsmoment DS	Steineranteil	Abstand des Randes zur neutralen Faser
$W = \frac{I}{z}$	$I_K = \frac{b * c^3}{12}$	$I_D = \frac{b * t^3}{12}$	$I_S = 2 * b * t * d_1^2$	$z = \frac{h}{2}$ $z \approx d_1$

Das Flächenträgheitsmoment eines Sandwichplattenwerkstoffes setzt sich aus den Eigenträgheitsmomenten der einzelnen Schichten (Kernschicht bzw. Deckschichten) sowie aus dem Steineranteil zusammen. Wenn das Kernmaterial der Sandwichplatte sehr biegeweich ist und die Deckschichten im Vergleich zur Gesamtdicke sehr dünn sind, dann können deren Eigenträgheitsmomente vernachlässigt werden. Hieraus ergibt sich, dass das Flächenträgheitsmoment auf den Steineranteil reduziert wird und für das Widerstandsmoment die folgende Gleichung 30 gilt.

$$W \approx \frac{2 * b * t * d_1^2}{d_1} \quad (30)$$

Widerstandsmoment einer Sandwichplatte:

$$W \approx 2 * b * t * d_1 \quad (29)$$

Widerstandsmoment einer monolithischen Platte mit Vollquerschnitt:

$$W = \frac{b * h^2}{6} \quad (31)$$

Gleichung 29 zeigt, dass sich das Widerstandsmoment einer Sandwichplatte proportional zur Plattendicke bzw. Deckschichtdicke verhält. Hingegen wird aus Gleichung 31 deutlich, dass eine monolithische Platte (Spanplatte) deutlich stärker von der Plattendicke beeinflusst wird, da die Plattendicke mit h^2 in die Berechnung des Widerstandsmomentes mit einfließt.

Biegeverformung

Biegeverformung durch 3-Punkt-Biegeprüfung ist definiert als

$$\omega_B = \frac{M \cdot l_1^2}{12 \cdot E \cdot I} \quad (32)$$

Nach dem Tabellenwerk von WAGNER und ERLHOF (1991) gelten für die Durchbiegung in der Mitte eines Prüfkörpers (f_M) folgende Grundbedingungen:

Tabelle 34: Grundbedingungen zur Herleitung der Biegeverformung verursacht durch 3-Punkt-Biegeprüfung

Durchbiegung	Bruchmoment
$E \cdot I \cdot f_M = \frac{1}{48} \cdot P \cdot l_1^3$	Nach EN 310 $M = \frac{P \cdot l_1}{4}$

Hieraus folgt:

$$f_M = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot l_1^3}{E \cdot I} \quad (33)$$

Biegeverformung nach EN 310 $f_M = \frac{M \cdot l_1^2}{12 \cdot E \cdot I} \quad (34)$

Biegeverformung durch 4-Punkt-Biegeprüfung ist definiert als

Biegeverformung nach DIN 53 293 $\omega_B = \frac{M \cdot l_1^2}{8,73 \cdot E \cdot I} \quad (35)$

Bei einer 4-Punkt-Biegeprüfung wird auf Grund der 2 Krafteinleitungspunkte der Faktor 12 durch den Faktor 8,73 ersetzt.

Schubverformung

Durch 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung verursachte Schubverformung ist definiert als:

Schubverformung nach EN 310 $\omega_S = \frac{F_{max} \cdot l_1}{4 \cdot G \cdot A} \quad (36)$

Schubverformung nach DIN 53 293 $\omega_S = \frac{F_{max} \cdot l_1}{8 \cdot G \cdot A} \quad (37)$

Tabelle 35: Grundbedingungen zur Herleitung der Schubverformung verursacht durch 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

Gleitung bzw. Winkeländerung	Schubsteifigkeit	Schubspannungen	Querkraft	Kraftarm
$\gamma = \frac{\tau}{G}$	$S = G * A$	$\tau = \frac{Q}{A}$	$Q = \frac{F_{max}}{2}$	EN 310 $a = \frac{l_1}{2}$ DIN 53 293 $a = \frac{l_1}{4}$

Hieraus folgt:

$$\gamma = \frac{Q}{G * A} \quad (38)$$

Durch die Belastung des Prüfkörpers entsteht eine Verformung (f_s) in der Probenmitte und eine Winkeländerung (γ) an den Auflagern (vgl. Abb. 40). Für die Winkeländerung gilt die Tangensfunktion:

$$\gamma = \frac{f_s}{a} \quad (39)$$

$$f_s = \gamma * a \quad (40)$$

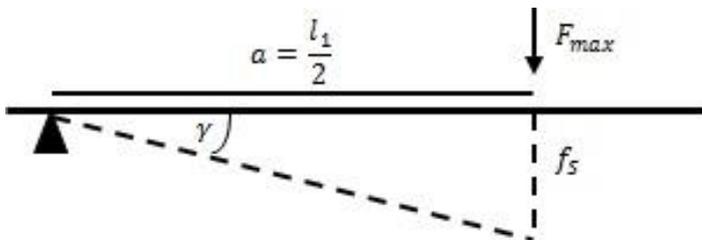


Abbildung 40: Schematische Darstellung der Verformung (f_s) und der Winkeländerung (γ) verursacht durch 3-Punkt-Biegung (nach Klein 2011).

Nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung gilt unter Zuhilfenahme der Gleichungen 40 und 38:

$$\text{Schubverformung nach EN 310} \quad f_s = \gamma * \frac{l_1}{2} \quad (41)$$

$$f_s = \frac{Q}{G * A} * \frac{l_1}{2} \quad (42)$$

$$f_s = \frac{F_{max} * l_1}{4 * G * A} \quad (43)$$

Schubverformung nach DIN 53 293 $f_S = \gamma * \frac{l_1}{4}$ (44)

$$f_S = \frac{F_{max} * l_1}{8 * G * A}$$
 (45)

10.2 Rohdichtepprofile

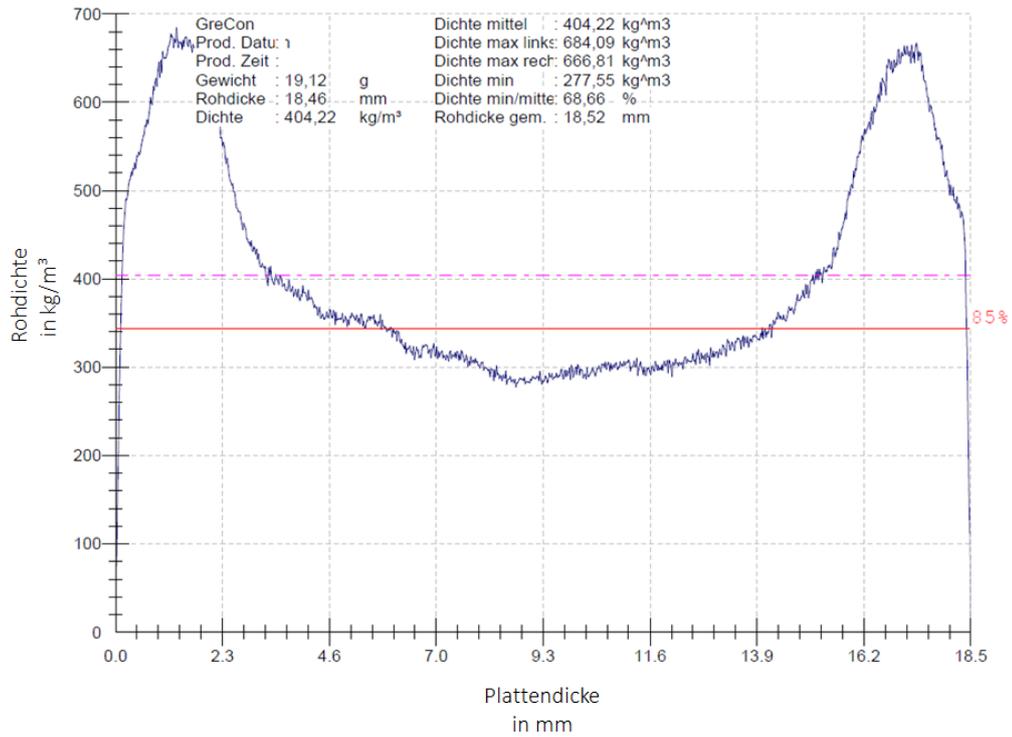


Abbildung 41: Rohdichteprofil einer Sandwichverbundplatte hergestellt im Einschrittverfahren. Die Sandwichverbundplatte besteht aus einem Popcornverbund (60 Gew.-%) sowie Deckschichten (40 Gew.-%) aus Holzspänen. Vgl. Kap. 3.4.2, Versuchsreihe V sowie Kap. 5.2.2.1.1, Tab. 26.

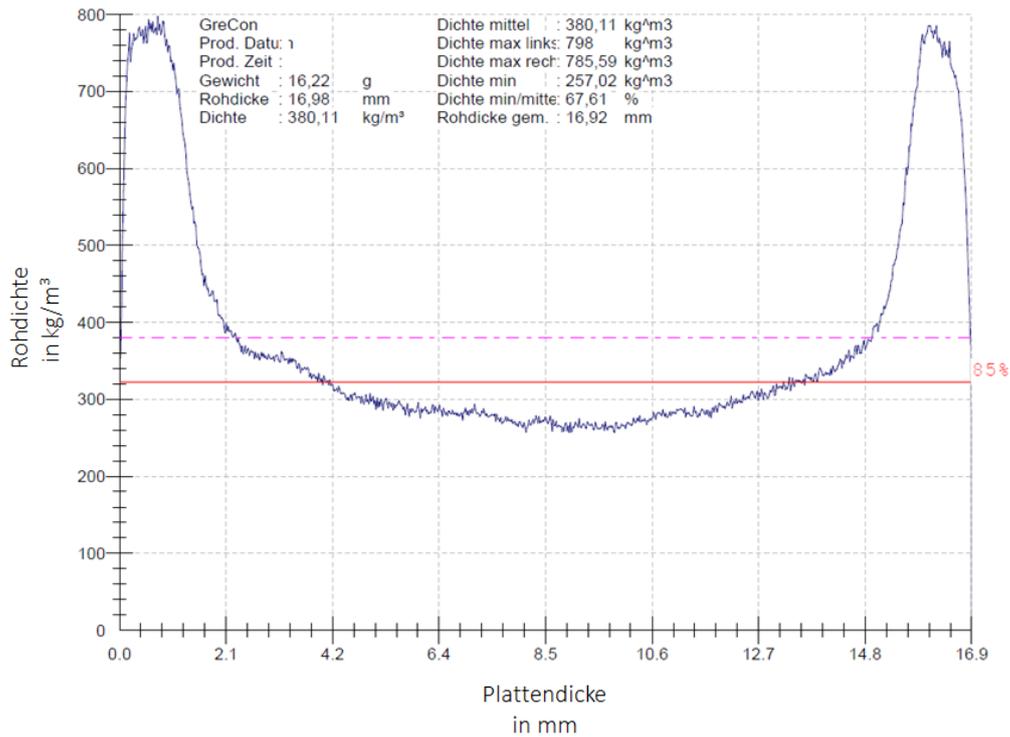


Abbildung 42: Rohdichteprofil einer Sandwichverbundplatte hergestellt im Einschnittverfahren. Die Sandwichverbundplatte besteht aus einem Popcornverbund (60 Gew.-%) sowie Deckschichten (40 Gew.-%) aus Holzfasern. Vgl. Kap. 3.4.2, Versuchsreihe V sowie Kap. 5.2.2.1.1, Tab. 26.

10.3 Bruchmomente

Tabelle 36: Bruchmomente und Standardabweichungen von industriell gefertigten Leichtbauplatten sowie Spanplatten ermittelt nach der 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeprüfung

Plattenvariante	Rohdichte in kg/m ³ ; Dicke in mm	Bruchmoment in Nmm 3-Punkt-Biegung	Bruchmoment in Nmm 4-Punkt-Biegung
Papierwabenplatte	380/ 27	81.320 (± 2156)	49.460 (± 1520)
Tischlerplatte	370/ 20	115.840 (± 920)	92.250 (± 1050)
BalanceBoard	550/ 19	19.900 (± 870)	17.250 (± 1490)
	510/ 28	45.170 (± 1040)	38.790 (± 850)
Spanplatte	790/ 10	14.010 (± 876)	13.320 (± 749)
	660/ 19	35.900 (± 1100)	31.230 (± 994)
	600/ 25	52.030 (± 1020)	43.220 (± 910)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Moira Burnett-Barking, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Entwicklung von leichten, dreischichtigen Sandwichverbundplatten unter Verwendung des Agrarrohstoffes Mais“ selbständig und auf wissenschaftlicher Basis bearbeitet und verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ferner versichere ich, dass alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht wurden und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer anderen Studie oder eines anderen Prüfungsverfahrens war.

----- Göttingen, im Mai 2016

(Moira Burnett-Barking)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Burnett-Barking
Vorname	Moira Phyllis
Geburtstag	16.09.1986
Geburtsort	Lübbecke/ Nordrhein Westfalen
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schulische Bildung

1997 – 2003	Realschule in Harsewinkel
2003	Fachoberschulreife
2003 – 2006	Gymnasium in Gütersloh
2006	Abitur

Studium

2006 – 2010	Bachelorstudium „Forstwissenschaften und Waldökologie“ an der Georg-August-Universität Göttingen
2010	Abschluss: Bachelor of Science
2010 – 2012	Masterstudium „Forstwissenschaften und Waldökologie“ an der Georg-August-Universität Göttingen Schwerpunkt: Holzbiologie und Holztechnologie
2012	Abschluss: Master of Science

Wissenschaftliche Tätigkeit

August 2012 bis heute	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Büsgen-Institut der Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, Arbeitsgruppe Chemie und Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen
-----------------------	--