



Bakterielle Nanocellulose

Wertschöpfung Nebenprodukte mit bakterieller Nanocellulose als Bindemittel

Forschungsbericht

Bericht Nr.	44BH-015556-R-01-FB-01
Auftrag Nr.	R.015556-10-44BH-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	31. Januar 2026
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald WHFF CH-3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Baustoffe und biobasierte Materialien Fachgruppe Biopolymere und Holzchemie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel +41 (0)32 344 03 41 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Theyge Nenz, Hendrick Schardey
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Ingo Mayer

Abstract

Die stoffliche Nutzung von Sägenebenprodukten ist für Sägewerke in der Schweiz eine Option zur Steigerung in Wertschöpfung dieser Reststoffe. In diesem Projekt wurden die Bindeeigenschaften von bakterieller Nanocellulose (BNC) als biobasiertes Bindemittel untersucht, um konventionelle Klebstoffe in Holzwerkstoffen zu ersetzen. Ziel war die Entwicklung eines Verbundwerkstoffs mit BNC gebundenen Sägenebenprodukten, die Analyse der wesentlichen Materialeigenschaften, die Bewertung des Recyclingpotenzials und eine ökonomische und ökologische Einschätzung zur Umsetzung der Herstellung in Sägewerken.

Werkstoffmuster wurden mittels Heisspressen hergestellt, wobei wesentliche Herstellungsparameter – Dichte, Partikelgrösse, BNC-Gehalt, Feuchtegehalt der Pressmatte und das Waschverfahren der BNC – variiert wurden. Die mechanische Charakterisierung erfolgte durch die Bestimmung der Querkzugfestigkeit, Biegesteifigkeit und der Wasseraufnahme. Produktionskosten und Umweltauswirkungen wurden mittels angepasster Spanplattenprozesse modelliert.

Höhere Dichten des Verbundwerkstoffs, kleiner Holzpartikelgrößen und ein BNC-Gehalt von 20 Gew.-% führen zu den besten Querkzugfestigkeiten. Der Verbundwerkstoff ist

vollständig recycelbar und lässt sich unter Wasserzugabe und Anwendung von Scherkräften wieder in einzelne Partikel auftrennen. Bei erneutem Verpressen waren lediglich 2 Gew.-% zusätzliche BNC erforderlich, um die mechanischen Eigenschaften nach dem Recycling aufrechtzuerhalten. Kosten und Umweltauswirkungen werden derzeit durch die Produktion der BNC dominiert, verringern sich jedoch mit jedem Recyclingzyklus. Branchenspezifische Workshops mit VertreterInnen aus Verpackung und Innenausbau identifizierten unterschiedliche potenzielle Anwendung für den Verbundwerkstoff im Verpackungs- und Innenausbauereich.

Die Ergebnisse zeigen das Potenzial von bakterieller Nanocellulose als Bindemittel sowie die technologische Möglichkeit auf, Sägenebenprodukte für leistungsfähige und recycelbare Verbundwerkstoff zu nutzen.

Keywords: Sägenebenprodukte, bakterielle Nanocellulose (BNC), Verbundwerkstoffe, Recyclingbarkeit

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage	5
1.2	Zielstellung	6
1.3	Vorgehensweise	6
2	Stand der Technik	7
2.1	Nanocellulose und ihr Potenzial als Bindemittel	7
2.1.1	Cellulose: Struktur und Zusammensetzung	7
2.1.2	Bakterielle Nanocellulose (BNC)	7
2.1.3	Cellulose-Nanokristalle (CNC)	9
2.1.4	Cellulose-Nanofibrillen (CNF)	9
2.2	Bindungstheorie für die mit Nanocellulose gebundenen Holzpartikel	11
2.3	Materialkonzepte	12
2.3.1	Holzwerkstoffe mit CNF als Bindemittel	12
2.3.2	Holzwerkstoffe mit BNC als Bindemittel	14
2.3.3	BNC in Verbundwerkstoffen	15
2.4	Mikroskopische Analyse der Bindungseigenschaften von Nanocellulose	16
2.5	Herstellungsprozess und -parameter	17
2.6	Bewertung des Recyclingpotenzials von Verbundwerkstoffen aus Nanocellulose	19
2.7	Mögliche zukünftige industrielle Umsetzung der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen	19
2.7.1	Bestehende Sägewerkstrukturen und -prozesse	19
2.7.2	Perspektiven der industriellen Herstellung von bakterieller Nanocellulose	19
2.7.3	Potenzieller Herstellungsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen	20
2.8	Produktions- und Rohmaterialkosten für BNC-Verbundwerkstoffe und Spanplatten	20
2.9	Umweltauswirkungen bei der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen und Spanplatten	21
3	Material und Methoden	22
3.1	Vorbereitung der BNC	22
3.1.1	Waschen	22
3.1.2	Homogenisierung	23
3.1.3	Entwässerung und Bestimmung des Feststoffgehalts der BNC	23
3.2	Vorbereitung der Holzpartikel	24
3.3	Herstellung der Werkstoffmuster	24
3.3.1	Bewertung der Prozessstabilität	25
3.3.2	Beschreibung der Variablen und Produktionsparameter	25
3.3.3	Herstellung des Verbundwerkstoffes und Pressverfahren	27
3.3.4	Bestimmung des Feuchtegehalts der Pressmatte	27
3.4	Bewertung und Verfahren zur Beurteilung des Recyclingpotenzials	28
3.5	Bestimmung der mechanischen, physikalischen und mikrostrukturellen Eigenschaften	28
3.5.1	Querzugfestigkeit	28
3.5.2	Biegesteifigkeit	28
3.5.3	Dickenquellung, Wasseraufnahme und Masseverlust	29
3.5.4	Mikrostruktur von BNC-Verbundwerkstoffmustern	29
3.6	Bewertung der Produktionskosten	29
3.7	Bewertung der Umtweltauswirkungen	30
3.8	Durchführung von branchenspezifischen Workshops	31
4	Ergebnisse	31
4.1	Grösse, Verteilung und Ertrag der Sägespäne	32
4.2	Prozessstabilität der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen	32
4.3	Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Performance von BNC-Verbundwerkstoffen	32
4.3.1	Unterschiedlich gewaschene BNC	32
4.3.2	Verhältnis von BNC zu Sägespänen	34

4.3.3	Dichteveriation der BNC-Verbundwerkstoffe	36
4.3.4	Holzpartikelgrösse	37
4.3.5	Feuchtegehalt der Pressmatte	38
4.3.6	Dicke, Dichte und Spangrösse	39
4.4	Dickenquellung und Wasseraufnahme	40
4.5	Rezyklierbarkeit und Performance von unterschiedlichen recycelten BNC-Verbundwerkstoffen	41
4.6	Mikroskopische Bilder der mit BNC gebundenen Sägespäne	44
4.7	Kostenvergleich der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen und Spannplatten	45
4.8	Bewertung der Umweltauswirkungen	47
4.9	Abschätzung der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen in Sägewerken	48
4.10	Potenzielle Anwendungen für BNC-Verbundwerkstoffe	49
4.10.1	Branchenspezifischer Workshop zu Verpackungen	49
4.10.2	Branchenspezifischer Workshop zum Innenausbau	51
4.11	Dokumentationsmaterial zur Kommunikation der Ergebnisse im Rahmen der Holzbranche und Lehre BFH-AHB	53
5	Diskussion	54
5.1	Mechanische Eigenschaften des BNC-Verbundwerkstoffs und Bindungsmechanismen	55
5.2	Rezyklierbarkeit von BNC-Verbundwerkstoffen	58
5.3	Produktionskosten von BNC-Verbundwerkstoffen	59
5.4	Bewertung der Umweltauswirkungen	59
5.5	Industrialisierung der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen in Sägewerken	60
5.6	Zukünftige Anwendungsfelder von BNC-Verbundwerkstoffen	61
6	Zusammenfassung und Ausblick	62
7	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	64
7.1	Umfang des Berichts	64
8	Verzeichnisse	65
8.1	Tabellenverzeichnis	65
8.2	Abbildungsverzeichnis	65
8.3	Diagrammverzeichnis	66
8.4	Literaturverzeichnis	67

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Jährlich werden 2,0 Mio. m³ Holz in Schweizer Säge- und Hobelwerken verarbeitet. Bei der Herstellung von Holzprodukten werden 60 % weiterverarbeitet und 40 % werden als Nebenprodukt klassifiziert. Diese Sägenebenprodukte (SNP) fallen in Form von Säge- und Hobelspänen, Hackschnitzel und Schwarzen an. Der Grossteil der SNP wurde für thermische Energie im Sägewerk genutzt oder zur Energiegewinnung an Dritte weitergegeben. Ein weiteres Drittel wird als Rohstoff in der Papier- und Zellstoffindustrie, sowie in Plattenwerken oder für die Weiterverarbeitung anderer Rohstoffe verwendet (Bundesamt für Statistik 2024). Eine Verlagerung der Nutzung dieser Nebenprodukte und Reststoffe hin zu einer zunächst stofflichen Nutzung bei höherer Wertschöpfung und der erst späteren energetischen Verwertung ist erstrebenswert.

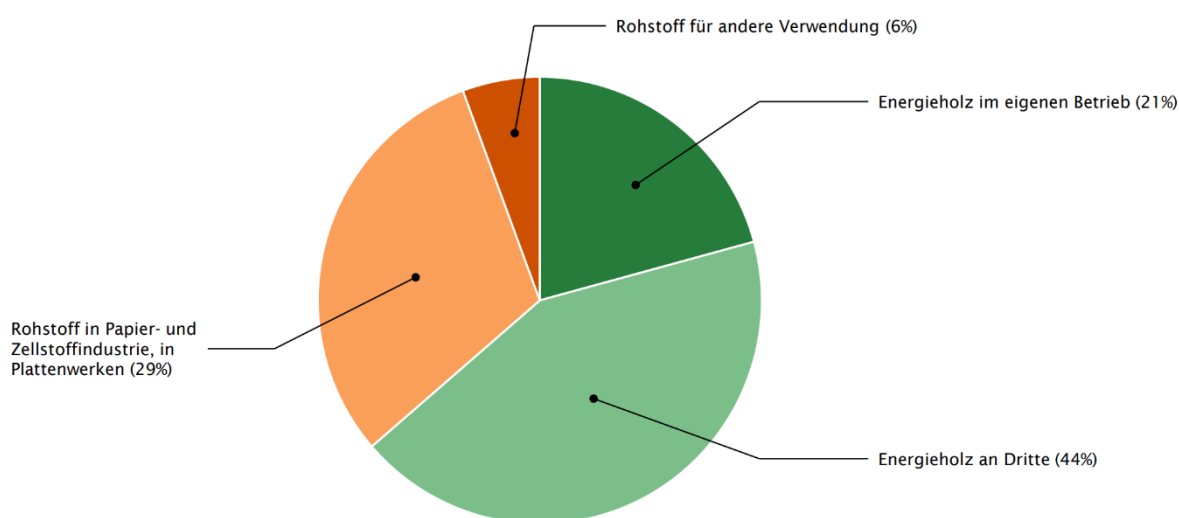


Diagramm 1: Restholzwertung in den Sägereien 2023 (Bundesamt für Statistik 2024)

Eine Strategie zur Steigerung der Wertschöpfung von SNP besteht darin, diese zu plattenförmigen Materialien oder Verbundwerkstoffen zu verarbeiten. Typischerweise werden zur Herstellung von plattenförmigen Materialien und Verbundwerkstoffen temperaturhärtende Klebstoffe auf Erdölbasis wie UF-(Harnstoff-Formaldehyd)-Harz oder MUF-(Melamin-Harnstoff-Formaldehyd)-Harz verwendet. Wie diese Bindemittel hat auch bakterielle Nanocellulose (BNC) das Potenzial, Holzpartikel zu binden und damit plattenförmige Materialien herzustellen (Amini et al. 2017). Bislang gibt es jedoch kein umfassendes Verständnis der Bindungseigenschaften von BNC mit Holzpartikeln, so dass das Potential zum Einsatz von BNC in der Herstellung holzbasierter Verbundwerkstoffe nicht abgeschätzt werden kann.

Die steigende Nachfrage nach umweltfreundlichen und biobasierten Bindemitteln in der Holzwerkstoffindustrie unterstreicht die Notwendigkeit, herkömmliche formaldehydbasierte Bindemittel durch innovative, nachhaltigere Alternativen zu ersetzen. Die Verwendung von Cellulose als Bindemittel wurde bereits in unterschiedlichen Studien beschrieben. In den meisten Forschungsarbeiten wurden Cellulose-Nanofibrillen (CNF) aufgrund ihrer guten physikalischen und mechanischen Eigenschaften als Bindemittel verwendet (Kojima, Kato et al. 2019; Hafez et al. 2020). Andere Studien haben das Potenzial von bakterieller Nanocellulose als Bindemittel in Verbundwerkstoffen untersucht (Yue et al. 2022). Die grössten Herausforderungen bei der Anwendung und grosstechnischen Herstellung von BNC sind hierbei die hohen Kosten der Medien und die geringe Produktivität im industriellen Massstab.

Die Umwandlung von Industrieabfällen in Grundstoffe oder Verbundwerkstoffe für den Einsatz in der Werkstoffherstellung hat jedoch an Bedeutung gewonnen (Hussain et al. 2019). Ein Beispiel für einen solchen Ansatz ist die saubere Biotechnologie, bei der durch Fermentation von kostengünstigen Substraten und Abfällen aus verschiedenen Industriezweigen (Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie und Brauerei) recycelt und wiederverwendet werden, um BNC herzustellen. In der Studie von Hussain et al. (2019) wird erwartet, dass eine kostengünstige Produktion die Industrialisierung und Kommerzialisierung

rung von BNC vorantreiben und letztendlich in Zukunft zu einem kostengünstigen Endprodukt führen wird.

Dieser Herstellungsansatz auf Basis von Abfall- oder Reststoffen aus der Industrie (in diesem Fall der Lebensmittelindustrie) wird auch von der Treeless AG verfolgt, dem Lieferanten der bakteriellen Nanocellulose für die in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen. Die Treeless AG befasst sich mit den wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen der traditionellen Nanocelluloseproduktion. Treeless arbeitet an einem Verfahren, bei dem spezielle Bakterien eingesetzt werden, um BNC lokal und kostengünstig herzustellen. Zu diesem Zweck sollen skalierbare, automatisierte modulare Farmen eingesetzt.

1.2 Zielstellung

Ein Ziel dieses Projektes ist es, bestehende Wissenslücken zu den Bindungseigenschaften zwischen Holzpartikeln und BNC zu schliessen. Dafür werden unterschiedliche Studien berücksichtigt, die sich mit den Bindungstheorien von unterschiedlichen Nanocellulosearten beschäftigt haben. Es soll so die Machbarkeit eines Verfahrens zu Herstellung von Verbundwerkstoffen aus SNP und BNC überprüft werden. Hierbei sollen die wichtigsten Prozessparameter und wesentlichen Materialeigenschaften des Verbundwerkstoffs bestimmt werden.

Ebenso soll das Recyclingpotenzial der BNC-Verbundwerkstoffe angesichts der wachsenden Nachfrage nach recycelbaren Produkten abgeschätzt werden. Ziel ist es, das Verhalten der hergestellten Werkstoffmuster nach einem oder mehreren Recyclingschritten hinsichtlich mechanischer Eigenschaften zu untersuchen. Zusätzlich soll beurteilt werden, wie sich die Eigenschaften der Verbundwerkstoffen durch das Recycling verändern und mit welche Massnahmen wichtige Werkstoffeigenschaften nach dem Recycling aufrechterhalten werden können.

Ein weiteres Ziel ist die Einschätzung der technischen und ökonomischen Umsetzung der Herstellung von Verbundwerkstoffen innerhalb der bestehenden Infrastruktur eines Sägewerks. Damit liesse sich eine Aussage dazu machen, ob es ökonomisch-technisch sinnvoll erscheint, in Sägewerken zusätzliche Wertschöpfung mit SNP neben der Energiegewinnung im eigenem Betrieb zu ermöglichen.

Zudem soll neben der Berechnung der Produktionskosten eine Ökobilanz für die Herstellung der BNC-Verbundwerkstoffe erstellt werden.

In Zusammenarbeit mit Unternehmen aus unterschiedlichen Teilbranchen sollen in Workshops potenzielle Anwendungen für einen Verbundwerkstoff aus Holzpartikel und BNC diskutiert und definiert werden. Dies soll dazu dienen, eine konkrete Entwicklung bestimmter Anwendungen in Konsortien nach Abschluss des BAFU WHFF-Projektes voranzutreiben.

1.3 Vorgehensweise

Um die Parameter zur Herstellung und für das Recycling der Verbundwerkstoffe zu bestimmen, werden verschiedene Einflussfaktoren (Variablen) identifiziert. Diese werden kontrolliert und variiert, um Werkstoffmuster mit unterschiedlichen Eigenschaften im Labormassstab herzustellen. Die Eigenschaften dieser Muster werden anschliessend geprüft und mit den in der SN EN 312:2010 (2010) angegebenen Werten sowie mit Ergebnissen aus anderen Studien verglichen.

Zur Bewertung der ökonomischen Umsetzung der Verbundherstellung wird eine Kostenabschätzung der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen und ein Vergleich mit den Herstellkosten von Spanplatten durchgeführt, wobei die Rohstoffkosten für die bakterielle Nanocellulose und die Kosten für Sägespäne sowie der Energiebedarf berücksichtigt werden. Zusätzlich werden die Investitionskosten für die erforderliche Infrastruktur sowie die Betriebs- und Wartungskosten der Anlage mit denen einer Spanplattenproduktionsstätte bei dem Kostenvergleich berücksichtigt.

Darüber hinaus wird eine Ökobilanz zur Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen durchgeführt. Dabei werden Daten aus dem bestehenden Spanplattenherstellungsprozess verwendet und an den Herstellungsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen angepasst. Dieser Prozess wird dann hinsichtlich des Treibhauspotenzials bewertet.

Um potenzielle Anwendungen zu erarbeiten, werden branchenspezifische Workshops durchgeführt, in denen Ideen gesammelt und die Machbarkeit dieser Anwendungen mit VertreterInnen aus den Branchen diskutiert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Nanocellulose und ihr Potenzial als Bindemittel

Das Interesse zur Nutzung von Cellulose als biobasierte Ressource und Alternative zu erdölbasierten Produkten wächst (Nasir al. 2022; Kojima, Isa et al 2014). In verschiedenen Studien konnte bereits belegt werden, dass Cellulose ein vielseitiges biobasiertes Material ist, das in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden kann, z.B. als Beschichtungsmaterial, in der Biomedizin und vielen weiteren Anwendungsbereichen sowie als Bindemittel in Spanplatten, Faserplatten oder Laminaten (Tayeb et al. 2018). Im Folgenden werden verschiedene Typen von Nanocellulose und ihre Verwendung als Bindemittel in Verbundwerkstoffen beschrieben.

2.1.1 Cellulose: Struktur und Zusammensetzung

Cellulose ist ein natürlich vorkommendes, hydrophiles Homopolymer mit der allgemeinen Formel $C_6H_{10}O_5$ (Tayeb et al 2018; D. Gardner et al. 2008; Kalia et al 2011). Die elektrostatischen Anziehungen zwischen benachbarten Sauerstoff- und Wasserstoffatomen führen zu intramolekularen Anziehungskräften (sogenannten Wasserstoffbrückenbindungen, wobei keine echte kovalente chemische Bindung entsteht), die die das Cellulose-Homopolymer stabilisieren und zu linearen Kettenkonfigurationen führen. Diese Ketten werden als elementare Cellulosefibrillen bezeichnet. Zusätzlich führen die Wasserstoffbrücken zwischen den Polymerketten (intermolekulare Wasserstoffbrücken) zusammen mit den Van-der-Waals-Kräften zu einer Anordnung von einzelnen Elementarfibrillen in Bündeln mit bis zu ca. 100 Elementarfibrillen werden, die als Mikrofibrillen bezeichnet werden (Eero Sjöström 1993).

Diese nichtkovalenten Wasserstoffbrücken innerhalb und zwischen den Ketten sind für die Aufrechterhaltung der Stabilität und Struktur der Cellulose von wesentlicher Bedeutung. Je nach Vorhandensein primärer und sekundärer Alkohole auf der Oberfläche kann Cellulose unterschiedliche Grade von Wasserstoffbrückenbindungen besitzen (Pizzo et al 1985). Innerhalb der Cellulosefibrillen gibt es zwei unterschiedliche Regionen, die sich strukturell unterscheiden. Zum einen gibt es die hoch geordneten kristallinen Bereiche und zum anderen die ungeordneten amorphen Bereiche. Durch den Einsatz verschiedener Techniken können zwei häufig verwendete Formen von Nanocellulose, Cellulose-Nanokristalle (CNCs) und Cellulose-Nanofibrillen (CNF), von der nativen Cellulose getrennt werden. Eine weitere Form von Cellulose, die bakterielle Nanocellulose (BNC), wird hingegen von bestimmten gramnegativen Bakterienarten aus einzelnen Glucose-Monomeren synthetisiert und unterscheidet sich von den beiden anderen Arten (CNF und CNCs) dadurch, dass sie einen natürlichen Bottom-up-Bildungsprozess durchläuft, im Gegensatz zu den Top-down-Methoden bei der Herstellung von CNC und CNF (Klemm, Kramer et al. 2011). Diese drei Arten von Cellulosenanomaterialien können in all ihren Variationen als Cellulosenanopartikel kategorisiert werden (ISO/TS 229 2017).

Neben ihren einzigartigen physiochemischen und für viele Anwendungen interessanten Eigenschaften weisen Cellulosenanomaterialien auch ein Potenzial als Ersatz für synthetische erdölbasierte Bindemittel und Klebstoffe auf (Tayeb et al. 2018). BNC, CNF and CNC unterscheiden sich durch ihre Herstellungsverfahren und ihre morphologischen und mechanischen Eigenschaften. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten morphologischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Herstellungsverfahren der verschiedenen Nanocellulosen beschrieben.

2.1.2 Bakterielle Nanocellulose (BNC)

Das natürliche Polymer Cellulose kann auf eine effiziente Art von Acetobacter-Bakterien der Gattung Gluconacetobacter synthetisiert werden. Diese Bakterien sind überall vorhanden, wo Zucker und pflanzliche Kohlenhydrate fermentieren (Klemm, Kramer et al. 2011). Bei grösseren Mengen eines flüssigen

Mediums synthetisieren die Bakterien das Polymer an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft (Klemm, Heublein et al. 2005; Nakagaito et al. 2005). Die gebildeten Celluloseketten werden in das wässrige Kulturmedium ausgeschieden, wo sich die Fibrillen mit Durchmessern im Nanometerbereich bilden. Die Fibrillen weisen in der Regel einen rechteckigen Querschnitt mit Abmessungen von 6-10 nm x 30-50 nm auf (Chisuzu et al. 1998; Moon et al. 2011). Sie verbinden sich und bilden ein dreidimensionales Cellulosenanofasernetz (Klemm, Kramer et al. 2011). Die Cellulosenanofasern, die aus Fibrillen bestehen, haben einen Durchmesser von 35-90 nm und eine Länge von 200 nm bis zu mehreren Millimetern.

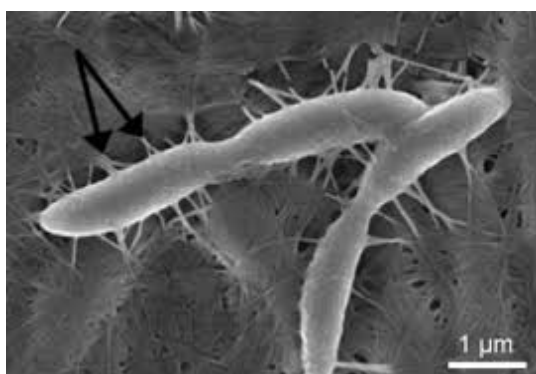


Abbildung 1: *Gluconacetobacter*-Bakterien bei der Bildung von Cellulosefibrillen, die sich zu einem Nanofasernetzwerk verbinden (Klemm, Kramer et al. 2011)

Eine Besonderheit von BNC ist die Kontrolle der Celluloseproduktion während der Biosynthese. Mehrere Faktoren beeinflussen die Effizienz und Struktur der Produktion durch Bakterien. Die Struktur des Nanofasernetzwerks von BNC kann durch die Wahl der Bakterienkultur gezielt gestaltet werden (Klemm, Kramer et al. 2011). Zudem können die Zufuhr von Sauerstoff sowie Steuerung des pH-Werts und der Temperatur die mechanischen Eigenschaften oder den Kristallinitätsgrad der BNC beeinflussen (J. Wang et al. 2019). Darüber hinaus haben wasserlösliche Zusatzstoffe im Nährmedium einen erheblichen Einfluss auf die Netzwerkstruktur. (Klemm, Kramer et al. 2011). Durch die Modifikation der Kulturgrenzschicht können orientierte BNC-Fibrillen erreicht werden und eine Erhöhung des Orientierungsgrades, der Faserbreite sowie des Quellungsgrades und des Zugmoduls erzielt werden (Putra et al. 2009).

Der signifikante Unterschied im Faserdurchmesser zwischen pflanzlicher und bakterieller Cellulose sowie erhebliche Unterschiede in der Architektur der Nanofasern, obwohl sie dieselbe Molekülformel haben, führen zu Eigenschaften, die sich deutlich von denen herkömmlicher Cellulose unterscheiden (Rainer et al. 1998; Klemm, Schumann et al. 2001; Yamanaka et al. 1989). Im Vergleich zu herkömmlicher pflanzlicher Cellulose und anderen Polymeren weist BNC spezielle Eigenschaften auf. Erstens kann sie aus einfachen, niedermolekularen Ausgangsstoffen synthetisiert werden. Darüber hinaus ist eine Steuerung der Cellulosebildung möglich, welche die Form, Struktur und Zusammensetzung der Formkörper direkt während der Biosynthese umfasst. Die nanoskaligen Abmessungen der BNC-Fibrillen führen zu einer beträchtlichen Oberfläche. Dies ermöglicht eine intensive Interaktion mit den umgebenden Medien, darunter Wasser, anderen niedermolekularen und polymeren Stoffe mit funktionellen Gruppen, die aktiv Wasserstoffbrückenbindungen bilden, was allgemein für Nanopartikel unterschiedlicher Herkunft gilt (Klemm, Kramer et al. 2011).

Im Gegensatz zu anderen Cellulose Typen wie CNF enthält BNC keine pflanzlichen Bestandteile wie Lignin, Hemicellulose und Pektin, kann aber Bakterienzellen oder Restnährstoffe enthalten, die leicht vom BNC-Netzwerk getrennt werden können (Watanabe A et al 1997). Während des Biosyntheseprozess bilden sich Cellulosenetzwerkstrukturen, die in der Lage sind, grosse Mengen an Wasser einzuschliessen und stabile Hydrogele formen können. Je nach Wachstumsmedium kann die synthetisierte Cellulose eine hohe Transparenz ausweisen und besitzt typischerweise Poren mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm. Das in den Cellulosenetzwerken gebundene Wasser dient als wichtiger Raumfüller und als Wasserstoffbrückenbindungspartner der Cellulose und wirkt damit als stabilisierendes Element für die dreidimensionale Netzwerkstruktur (Klemm, Kramer et al. 2011). Die Wasseraufnahmekapazität von BNC beträgt das 100-fache seines Eigengewichts (Hussain et al. 2019). Die Trocknung der Netzstruktur kann diese entweder zerstören oder gezielt verändern (Klemm, Kramer et al 2011). Darüber hinaus zeichnet sich BNC durch einen hohen Polymerisationsgrad von 4000 bis 10000 Anhydroglucose-Einheiten

ten aus (Watanabe et al. 1997). BNC hat eine hohe Kristallinität von 80 bis 90 % und eine hohe Einzel-faserfestigkeit, die mit der von Stahl oder Kevlar vergleichbar ist (Klemm, Kramer et al. 2011). Ausserdem ist BNC leicht biologisch abbaubar und ungiftig. (Klemm, Schumann et al. 2001; Salmon et al. 1997; Kennedy et al. 1995; Guhadós et al. 2005; Cheng et al. 2022; Randhawa et al. 2022).

Das Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Nanocellulose ist begrenzt, da mehrere Faktoren die gemessenen Werte stark beeinflussen können. Dazu gehören die Kristallstruktur, der Grad der Kristallinität, die Anisotropie, Defekte und die verwendeten Messmethoden. Um ein tieferes Verständnis dieser Eigenschaften zu erlangen, sind weitere detaillierte und systematische Untersuchungen erforderlich (Moon et al. 2011).

2.1.3 Cellulose-Nanokristalle (CNC)

Gemäss ISO/ TS 229 (2017) ist ein Cellulose-Nanokristall (CNC) ein Nanokristall, der überwiegend aus Cellulose mit mindestens einer Elementarfibrille besteht, überwiegend kristalline und parakristalline Bereiche enthält, ein Seitenverhältnis von in der Regel weniger als 50, aber in der Regel mehr als fünf besitzt, keine Längsspalten, keine Verflechtung zwischen den Partikeln und keine netzwerkartigen Strukturen aufweist. Darüber hinaus sind Cellulose-Nanokristalle (CNC) (auch als nanokristalline Cellulose, Cellulose-Whisker, Cellulose-Nanowhisker und Cellulose-Mikrokristalle bezeichnet (Moon et al. 2011)) stäbchen- oder whiskerförmige Partikel, die durch Säurehydrolyse von Holzfasern, Pflanzenfasern, mikrofibrillierter Cellulose oder Cellulose-Nanofibrillen gewonnen werden (Garcia de Rodriguez et al. 2006; Beck-Candanedo et al. 2005).

CNC werden durch saure Hydrolyse der amorphen Bereiche von teilkristallinen Cellulosefasern mit Mineralsäuren gewonnen. Der Prozess beginnt mit der Entfernung der amorphen Celluloseanteile auf der Faseroberfläche und setzt sich mit dem Abbau der leichter zugänglichen amorphen Bereiche fort, wodurch die stäbchenförmige kristalline Cellulose freigelegt wird. Sobald der Celluloseabbau ausreichend fortgeschritten ist, wird das Säuregemisch verdünnt, und die Säure sowie Verunreinigungen werden durch wiederholtes Zentrifugieren und umfangreiche Dialyse vollständig entfernt (Cheng et al. 2022). Danach folgt ein mechanischer Dispersionsprozess, in der Regel durch Ultraschallbehandlung, der die Nanokristalle in einer homogenen und stabilen Suspension verteilt. Die Struktur, die Eigenschaften und das Phasentrennungsverhalten der CNC hängen von der Art und Konzentration der verwendeten Mineralsäure, der Hydrolysetemperatur sowie der Dauer und Intensität der Ultraschallbehandlung ab (Beck-Candanedo et al. 2005; Dong et al. 1996; Bondeson et al. 2006).

Die Morphologie und Grösse der Nanokristalle hängt stark von der Cellulosequelle und der Verarbeitungstechnik ab. Hochkristalline Cellulosequellen wie Manteltiere und Algen produzieren Nanokristalle mit einem hohen Aspektverhältnis und Längen von bis zu mehreren Mikrometern (durchschnittlich 3-5 nm breit, 50-500 nm lang), während weniger kristalline Holzfasern kleinere Nanokristalle freisetzen (Hoeng et al. 2016; Moon et al. 2011). Cheng et al. (2022) berichteten, dass CNC-Fasern einen Durchmesser von 5-60 nm und eine Länge zwischen 100 nm und 300 nm erreichen. Ihre Kristallinität beträgt 82 %. Die grosse Oberfläche der CNC führt zu hervorragenden mechanischen Eigenschaften und bietet eine gute Oberflächenreaktivität, die die Einführung funktioneller Gruppen durch chemische Derivatisierung (Kloser et al. 2010; Azzam et al. 2010) oder Oxidation (Habibi, Chanzy et al. 2006) ermöglicht. CNC werden u.a. zur mechanischen Verstärkung von Verbundwerkstoffen eingesetzt (Hoeng et al. 2016). Ausserdem ist die Oberfläche von Cellulose-Whiskern reich an Hydroxylgruppen. Bei Kontakt mit polaren Oberflächen gehen diese Gruppen Wasserstoffbrückenbindungen ein, was zu einer erheblichen Verstärkung der Grenzfläche führt und damit die mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen positiv beeinflusst (D. Gardner et al. 2008). Zu den weiteren Eigenschaften, die CNCs für die Verwendung in Verbundwerkstoffen attraktiv machen, gehören hohe Steifigkeit und Oberfläche, geringe Rauheit und eine Dichte von etwa 1,6 g/cm³ (Rainer et al. 1998).

2.1.4 Cellulose-Nanofibrillen (CNF)

Gemäss ISO/ TS 229 (2017) besteht eine Cellulose-Nanofibrille aus mindestens einer Elementarfibrille, die kristalline, parakristalline und amorphe Bereiche mit einem Seitenverhältnis von in der Regel mehr als zehn enthält, die Längsspalten, Verflechtungen oder netzartige Strukturen aufweisen können.

CNF werden durch die mechanische Verarbeitung von Cellulosefasern gewonnen, die sowohl amorphe als auch kristalline Bereiche aufweisen. CNF können aus einer Reihe von Quellen, darunter Baumwolle, Holz und einjährige Pflanzen, durch mechanisches Aufbrechen von Cellulosefasersuspensionen unter hohen Scherkräften hergestellt werden. Bei der Extraktion von CNF bildet sich durch den mechanischen Aufschluss der Cellulosefasern ein viskoses Gel. Die mechanische Scherkraft führt nach und nach zu einer Längsspaltung der Cellulosefasern, was zur Bildung von Nanofibrillen führt (Hoeng et al. 2016). Zu den üblichen Prozessen bei der mechanischen Fibrillierung gehören Zerkleinerung, Mikrofluidisierung und Homogenisierung (Habibi, Lucia et al. 2010), bei denen die Cellulosesuspension vor der CNF-Isolierung mehrere Durchgänge durch das Gerät durchläuft. Diese Verfahren sind sehr energieintensiv. Daher wurden Vorbehandlungsmethoden wie die enzymatische Behandlung (Henriksson et al. 2007) und die TEMPO-Oxidation (Saito et al. 2006) eingesetzt, um die Fibrillierung der Cellulosefasern zu erleichtern und die Anzahl der erforderlichen Durchgänge zu verringern. Die Umsetzung dieser Vorbehandlungsmethoden hat zu einer Verringerung des Energieverbrauchs geführt und ermöglicht seit 2010 die Produktion von CNF im industriellen Massstab (Hoeng et al. 2016). Der Unterschied zwischen CNF und MFC (mikrofibrillierte Cellulose) liegt im Fibrillierungsprozess, der bei CNF zu feineren Partikeldurchmessern führt. In der Literatur werden die Begriffe MFC und CNF jedoch manchmal als Synonym verwendet, was zu Verwechslungen führen kann (Moon et al. 2011). CNF-Filamente weisen ein hohes Aspektverhältnis auf (4-20 nm breit, 500-2000 nm lang) (Moon et al. 2011), je nach Quelle, Verarbeitung und Vorbehandlungstechnik kann dieses Verhältnis variieren (Hoeng et al. 2016). Darüber hinaus berichteten Klemm, Kramer et al. (2011), dass es Unterschiede in der Grösse und Aggregation der Elementarfilamente zwischen den S1- und S2-Schichten im Holz gibt, die ebenfalls zu den beobachteten Diskrepanzen bei den angegebenen Grössen der CNF beitragen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die beobachteten Unterschiede bei den angegebenen Abmessungen von CNF auf die spezifische Rohstoffquelle und die angewandten Vorbehandlungsmethoden zurückzuführen sind. Es ist daher nur möglich, Spannen für die jeweiligen Abmessungen anzugeben. Ihre herausragenden Eigenschaften wie biologische Abbaubarkeit, bemerkenswerte mechanische Eigenschaften, grosse Oberfläche und geringes Gewicht wurden in vielen Berichten ausführlich diskutiert (Moon et al. 2011; Habibi, Lucia et al. 2010). Die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Hydroxylgruppen bewirken eine hochgradig geordnete Anordnung der Celluloseketten innerhalb der elementaren Fibrillen, was ihre Haftung an anderen polymeren Bestandteilen wie Lignin oder Proteinen verbessert und die Bildung von Netzwerken in wässriger Umgebung begünstigt (D. Gardner et al. 2008). Darüber hinaus erleichtert die grosse Oberfläche, die sich aus den nanoskaligen Dimensionen ergibt, eine starke Adhäsion aufgrund der grösseren Exposition der Hydroxylgruppen (D. Gardner et al. 2008; Hafez et al. 2020).

Insgesamt ist das Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Cellulosenanofasern begrenzt. Die geringen Abmessungen in Verbindung mit den begrenzten Methoden und Techniken, die zur Charakterisierung zur Verfügung stehen, macht die quantitative Messung der mechanischen Eigenschaften zu einer grossen Herausforderung. Mehrere Faktoren können die gemessenen Eigenschaften beeinflussen und zu einer breiten Streuung der berichteten Werte beitragen, sowohl zwischen verschiedenen Cellulose Typen als auch innerhalb derselben Celluloseart. Zu diesen Faktoren gehören unter anderem die Kristallstruktur, der Kristallinitätsgrad, die Anisotropie, Defekte und die Methoden und Techniken, die zur Messung von Eigenschaften verwendet wurden (Moon et al. 2011). Die angegebenen Werte für die Grössen der Cellulose Typen variieren ebenfalls und hängen von der Quelle des Rohmaterials und den angewandten Verarbeitungs- und Modifizierungsmethoden ab (Klemm, Kramer et al. 2011; Moon et al. 2011; Hoeng et al. 2016; Cheng et al. 2022). Cheng et al. (2022) hat die wichtigsten Eigenschaften und die berichteten Grössen von CNC, CNF und BNC in einer Übersicht zusammengefasst (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich von unterschiedlichen Arten von Nanocellulose (Cheng et al. 2022)

CNC	CNF	BNC
-----	-----	-----

Quelle	Mikrokristalline Cellulose	Kraftzellstoff	Biosynthese von Bakterien
Durchmesser	5-60 nm	5-300 nm	30-80 nm
Länge	100-300 nm	Nano-Mikrometer	Nano-Mikrometer
Optische Eigenschaften	Schillernde Filme	Transparente Filme	Transparente Filme
Hauptanwendungen	Beschichtungen, Klebstoffe, Lebensmittel, Farben	Arzneimittelabgabe, Kosmetik, Verstärkungsmittel	Biomedizin, Implantate, Wundauflagen
Ökotoxizität	Gering	Gering	Gering
Entsorgung	Biologisch abbaubar	Biologisch abbaubar	Biologisch abbaubar

2.2 Bindungstheorie für die mit Nanocellulose gebundenen Holzpartikel

Es wird davon ausgegangen, dass für die Bindung von Cellulose-Cellulose, Cellulose-Nanofasern und anderen lingocellulosehaltigen Materialien Wasserstoffbrückenbindungen eine entscheidende Rolle spielen (Hubbe 2006). Wasserstoffbrückenbindungen sind sich anziehende elektrostatische Wechselwirkungen zwischen einem positiv polarisierten Wasserstoffatom und einem stark elektronegativen Atom in einem anderen Molekül (oder innerhalb desselben Moleküls) (Arunan et al. 2011).

Bei geringem Feststoffgehalt lassen sich Cellulosenanomaterialien leicht in Wasser dispergieren und bilden ein dreidimensionales Netzwerk aus Nanofasern, die die Cellulosenanopartikel während des Trocknungsprozesses zusammenhalten. Die bemerkenswerten mechanischen Eigenschaften von Cellulosenanopartikeln in Verbindung mit ihrer Fähigkeit, sowohl intern als auch mit anderen Cellulosematerialien Wasserstoffbrückenbindungen zu bilden, machen sie zu idealen Bindemitteln für verschiedene Lingocellulosematerialien, einschliesslich Holzpartikeln, Cellulosefasern und Papier (Reising et al. 2012; Joseleau et al. 2012).

Eine vielversprechende Anwendung von Cellulose-Nanofibrillen (CNF) als Bindemittel ist die Herstellung von Spanplatten. CNF können starke Bindungen eingehen, was durch ihre grosse nanoskalige Oberfläche begünstigt wird, die die Adhäsion aufgrund der erhöhten Exposition von Hydroxylgruppen zwischen Nanocellulose und Holzpartikeln erheblich verbessert (Hafez et al. 2020; Fornué et al. 2011). Weitere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Stärke der Wasserstoffbrücken viel grösser sein kann als bisher angenommen und sich der Stärke kovalenter Bindungen annähert (Gilli et al. 2009). Die organisierte Struktur, der sich wiederholenden Wasserstoffbrückenbindungen in den kristallinen Bereichen der Cellulose erklärt die in der Cellulose beobachteten irreversiblen Wasserstoffbrückenbindungen hinreichend. Dieses Phänomen ist in den kristallinen Bereichen von Nanocellulose besonders deutlich. Bestimmte Trocknungsverfahren wie Sprühtrocknung, Ofentrocknung oder Gefriertrocknung, die entweder für Cellulosefasern oder bei nanoskalige Fasern wie CNC, CNF oder BNC angewandt werden, können zur Bildung von verhornten Cellulosefasern oder aggregierten Partikeln führen, die beide charakteristische irreversible Wasserstoffbrückenbindungen aufweisen. Diese irreversiblen Wasserstoffbrückenbindungen in Cellulose sind besonders widerstandsfähig gegen eine Störung durch chemische, mechanische oder thermische Mittel und gelten als Schlüsselfaktor für das starke Bindungsverhalten in Cellulosenanomaterialien (Peng et al. 2012; Ding et al. 2019). Der Begriff „Verhornung“ beschreibt den Prozess der Versteifung der Polymerstruktur, der durch die Trocknung oder Dehydratisierung von Lignocellulosematerialien ausgelöst wird.

Die Trocknung von Cellulose führt zu einer Verringerung des Innenvolumens der Fasern, die durch strukturelle Veränderungen in den Cellulosefasern selbst verursacht wird. Nach der Resuspendierung der Fasern in Wasser kann der ursprüngliche wassergequollene Zustand nicht vollständig wiederhergestellt werden (Fernandes Diniz et al. 2004). In der wissenschaftlichen Literatur herrscht Uneinigkeit über den Beitrag des Verhornungsphänomens zu irreversiblen Wasserstoffbrückenbindungen und seine möglichen Auswirkungen auf die Bindungen zwischen Holzpartikeln und Nanocellulose (Peng et al. 2012; Ding et al. 2019; D. Gardner et al. 2008).

Im Gegensatz zu kristallinen Bereichen können weniger geordnete amorphe Bereiche innerhalb der Cellulosenanofaserketten die Zugänglichkeit funktioneller Gruppen an der Oberfläche verbessern, was ebenfalls zu einer verbesserten Grenzflächenhaftung führt (Eriksson et al. 2007). Neben den Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Holzpartikeln und der Cellulose spielen auch die Bindungen innerhalb der Cellulose eine entscheidende Rolle, da sie ein dreidimensionales Netzwerk bilden, in dem die Holzpartikel eingeschlossen sind (Hafez et al. 2020; D. Gardner et al. 2008; Amini et al. 2017). Bei der Cellulose-Cellulose-Adhäsion machen Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals-Kräfte den Grossteil der intermolekularen Kräfte aus, die zur Stärke der Adhäsion beitragen. Jedoch ist in der Cellulose-Forschungsgemeinschaft umstritten, ob Van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrückenbindungen mehr zur Stärke der Cellulose-Cellulose-Bindung beitragen (Tajvidi et al. 2016).

Aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Cellulosenanopartikeln (Reising et al. 2012) und der starken Wasserstoffbrückenbindung mit anderen Cellulosematerialien (Joseleau et al. 2012) können CNF effektiv mit Holzpartikeln interagieren und ein sehr kohäsives Verbundsystem bilden. Während des Entwässerungs- und Trocknungsprozesses bildet sich ein dreidimensionales Netzwerk aus CNF, das eine gewebeähnliche Struktur bildet, die die Holzpartikel mechanisch stützt und die Gesamtfestigkeit des Holzpartikel-CNF-Verbundwerkstoffes erhöht. Zusätzlich zu den Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Holzpartikeln und den CNF trägt das Netzwerk der CNF zur Festigkeit des Verbundwerkstoffes bei. Auch die Bindungskräfte zwischen den Cellulosefibrillen spielen eine entscheidende Rolle (Hafez et al. 2020; D. Gardner et al. 2008; Amini et al. 2017; Kojima, Isa et al. 2014).

Es wird vermutet, dass zumindest kleine Teile der CNF-Partikel in Suspensionen in die Porenstrukturen der Holzpartikel eindringen können, um während des Heisspressens ein dreidimensionales Netzwerk aus Nanofibrillen zu bilden. Das entstehende fibrilläre Netzwerk hat die Fähigkeit, die Partikel einzukapseln und dem Verbundwerkstoff eine höhere Festigkeit und Steifigkeit zu verleihen. Die Stärke der Verbindung zwischen den beiden Holzpartikeln hängt vom Grad der Durchdringung der CNF und den Oberflächeneigenschaften sowohl der Holzpartikel als auch der Nanofibrillen ab, die das Ausmass der Wasserstoffbrückenbindung zwischen ihnen bestimmen (Tayeb et al. 2018; Tajvidi et al. 2016).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Verbundwerkstoffen aus Nanocellulose und Holzpartikeln die Bindung auf einer Kombination aus Wasserstoffbrücken und der Bildung eines dreidimensionalen Netzwerks beruht. Es wird davon ausgegangen, dass diese Netzwerke durch das Eindringen der Nanocellulosefasern in die Holzstruktur begünstigt werden und die Kohäsionskraft des Verbundwerkstoffes erheblich steigern können. Insgesamt ist das Verständnis dieser Bindungsmechanismen entscheidend für die Optimierung der Leistung und strukturellen Integrität von Verbundwerkstoffen auf Basis von Nanocellulose in verschiedenen Anwendungen (Amini et al. 2017).

2.3 Materialkonzepte

2.3.1 Holzwerkstoffe mit CNF als Bindemittel

Kojima, Kato et al. (2019) verwendeten recycelte Holzpartikel von 1-4 mm zur Herstellung von Spanplatten, wobei Cellulose-Nanofibrillen (CNF) in verschiedenen Konzentrationen (0 Gew.-%, 3 Gew.-%, 5 Gew.-%, 10 Gew.-% und 20 Gew.-%) als Bindemittel dienten. Die Spanplatten wurden gepresst, um eine Zieldicke von 9 mm zu erreichen. Die resultierenden Dichten lagen zwischen 0,57 g/cm³ und 0,69 g/cm³. Platten mit höheren CNF-Gehalten wiesen höhere Dichten auf, vor allem in den äusseren Schichten, da die CNF-Aggregate die Zwischenräume zwischen den Holzpartikeln ausfüllten. Die mechanischen Eigenschaften der Platten verbesserten sich mit zunehmendem CNF-Gehalt. Sowohl die Bruchfestigkeit als auch der Elastizitätsmodul (E-Modul) stiegen mit zunehmendem CNF-Gehalt an, was darauf hindeutet, dass die CNF die Festigkeit der Verbindung zwischen den Partikeln erhöhten. Im Einzelnen stieg die Bruchfestigkeit von 0,34 MPa/(g/cm³) ohne CNF auf 9,01 MPa/(g/cm³) mit 20 Gew.-% CNF. Diese Verbesserung wird darauf zurückgeführt, dass die CNF an den Holzpartikeln haften, sich auf deren Oberflächen verfangen und die Lücken zwischen ihnen schliessen. Die Querkzugfestigkeit verbesserte sich ebenfalls mit höherem CNF-Gehalt. Bei der Platte mit 20 Gew.-% CNF betrug diese 0,21 N/mm². Die Dickenquellung nahm mit steigendem CNF-Gehalt ab, was auf eine bessere Dimensionsstabilität aufgrund der verstärkenden Wirkung der CNF und ihrer Fähigkeit, stärkere Bindungen zwischen den Partikeln zu schaffen, hinweist. Bei Platten mit einem CNF-Gehalt von 3 Gew.-% betrug die Dickenquellung etwa 100 %, während die Dickenquellung bei Platten mit 20 Gew.-% nur etwa 70 % betrug. Die Wasseraufnahme blieb unverändert, da sowohl CNF als auch Holzpartikel hydrophil sind, aber die Di-

ckenquellung nahm ab, wahrscheinlich aufgrund der verbesserten Partikelverflechtung und Wasserstoffbrückenbindung durch die CNF. Die Platte mit dem besten Ergebnis, die 20 Gew.-% CNF enthielt, wies eine Bruchfestigkeit von 6,1 N/mm², eine Querkzugfestigkeit von 0,21 N/mm² und eine Dickenquellung von 74 % auf.

In Kojima, Ishino et al. (2015) wurde die Bindewirkung von nanofibrilliertem Holzmehl (LCNF) mit Holzmehl in Abhängigkeit von LCNF-Gehalt und Partikelgrösse untersucht. Die durchschnittliche Grösse der Holzmehlpartikel betrug etwa 220 µm. Es wurde eine spezifische Zusammensetzung von 80 Gew.-% Holzmehl und 20 Gew.-% LCNF analysiert. Um den Feuchtegehalt der Matte zu reduzieren und eine Delaminierung zu vermeiden, wurde die Mischung auf eine Holzfeuchte von 30 % getrocknet. Die 150 mm x 150 mm x 3 mm grossen Platten wurden für 10 min bei 120 °C und einem Druck von 0,85 MPa gepresst, um eine Zieldichte von 1 g/cm³ zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass die Verwendung kleinerer LCNF-Teilchen eine engere Vermischung mit dem Holzmehl ermöglichte, wodurch der Hohlraum in den gepressten Platten verringert wurde. Die mit LCNF hergestellten Platten wiesen im Vergleich zu den mit reinem Holzmehl hergestellten Platten verbesserte Eigenschaften auf. Insbesondere die Querkzugfestigkeit der mit dem kleinsten gemahlten LCNF hergestellten Platten war etwa fünfmal höher als die der Holzmehlplatten ohne LCNF-Zusatz. Die Bildung von Fibrillen in Nanogrösse auf der Faseroberfläche führte zu einer verbesserten Bindung zwischen dem Holzmehl und LCNF. Die Zugabe von 20 Gew.-% LCNF zu der Platte führte zu einer Querkzugfestigkeit von etwa 0,6 N/mm². Die Biegeeigenschaften der mit LCNF hergestellten Platten wiesen höhere Werte auf als die von reinem Holzmehl. Selbst bei einem LCNF-Gehalt von 5 Gew.-% waren die Biegeeigenschaften doppelt so hoch wie bei reinem Holzmehl. Die höchsten Werte wurden für Bretter mit einer Zusammensetzung von 10 % LCNF und 90 % Holzmehl erzielt, was als optimale Zusammensetzung angesehen wurde.

Die Studie von Amini et al. (2017) untersuchte die Entwicklung und Eigenschaften von Spanplatten, die mit Cellulose-Nanofibrillen (CNF) als Bindemittel verstärkt wurden. Als Ausgangsmaterial wurden Partikel aus Kiefer mit einer durchschnittlichen Länge von 3,8 mm und einem Feuchtegehalt von 7 % verwendet. Die CNF wurden mit einem Feststoffgehalt von 3 % verwendet. Der Herstellungsprozess umfasste Kaltpressen zur Entwässerung, gefolgt von Heisspressen bei 180 °C, um Platten mit einer Zieldichte von 0,60 g/cm³ bis 0,79 g/cm³ zu erhalten. Die Ergebnisse zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Bruchfestigkeit und der E-Modul, mit zunehmender Dichte der Spanplatte deutlich verbessert wurden. Eine Erhöhung des CNF-Gehalts von 15 auf 20 Gew.-% führte zu einer signifikanten Steigerung der Bruchfestigkeit, während der E-Modul kaum beeinflusst wurde. Die Forscher beobachteten, dass die Wasseraufnahme der Platten mit zunehmender Dichte abnahm, während die Dickenquellung umgekehrt zunahm, was auf Veränderungen der Porenstrukturen innerhalb der Platten zurückgeführt werden kann. Die Klebfestigkeitstests (ABES-Tests) zwischen CNF und den Holzpartikeln zeigten, dass die Oberflächenrauigkeit der Holzpartikel einen erheblichen Einfluss auf die Klebfestigkeit hatte. Die mit 400er-Schleifpapier bearbeiteten Partikel wiesen aufgrund der besseren mechanischen Verzahnung auf der geschliffenen Oberfläche die höchste Klebfestigkeit auf. Die Querkzugfestigkeit der Spanplatten wurde in verschiedenen Dichtegruppen (0,60 g/cm³ bis 0,75 g/cm³) und mit unterschiedlichen CNF-Gehalten (15 Gew.-% und 20 Gew.-%) gemessen. Die statistische Analyse zeigte, dass sich die Querkzugfestigkeiten zwischen den verschiedenen Dichtegruppen und CNF-Gehalten nicht signifikant unterschieden. Dies wurde auf die geringen Unterschiede in der Kerndichte aller Platten zurückgeführt, die in der Dichteprofilanalyse beobachtet wurden.

Die Dauer des Trocknungsprozesses spielte eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der Festigkeit der Adhäsion zwischen CNF und Holzpartikeln. Es konnte gezeigt werden, dass höhere Trocknungstemperaturen zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führten, was zumindest teilweise auf das Phänomen der Verhornung zurückgeführt wurde. Die Trocknung der Prüfkörper bis zum Fasersättigungspunkt hatte keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Das Trocknen der Prüfkörper unterhalb des Fasersättigungspunkts führte jedoch zu einer deutlichen Erhöhung der Festigkeit, indem das in der Zellwand des Holzes gebundene Wasser entfernt wurde. Bei einem Feuchtegehalt von etwa 10 % wurden etwa 90 % der maximalen Festigkeit erreicht.

In der Studie von Hafez et al. (2020) wurden die Herstellung und die Eigenschaften von Spanplatten mit CNF als Bindemittel untersucht. Die CNF mit einem Feststoffgehalt von 3 Gew.-% wurde aus mechanisch aufbereitetem Holzzellstoff hergestellt. Es wurden drei verschiedene Bindemittelgehalte getestet: 10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%. Die Platten wurden mit einem Druck von 3,7 MPa entwässert, wodurch der Feuchtegehalt von etwa 80 % auf 40 % gesenkt wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass es signi-

fikante Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften der Spanplatten bei einem Bindemittelgehalt von 10 Gew.-% und 20 Gew.-%. Insbesondere war der CNF-Anteil im Kern der Platten mit 20 Gew.-% Bindemittelgehalt höher, was zu einer stärkeren Bindung führte. Die Testergebnisse zeigten, dass Platten mit 10 Gew.-% Bindemittel eine Querkzugfestigkeit von 0,17 N/mm² aufwiesen, wobei der Bruch in der Mitte der Prüfkörper auftrat. Im Vergleich dazu wiesen die Platten mit 20 Gew.-% Bindemittel eine höhere Querkzugfestigkeit von über 0,24 N/mm² auf.

Das Ziel von Leng et al. (2017) war es, die Bindungseigenschaften von nassgeformten Spanplatten unter Verwendung von Cellulose-Nanofibrillen als Bindemittel zu analysieren. Zu den untersuchten Schlüsselfaktoren gehörten die Plattendichte, der CNF-Gehalt, die Pressmethode (konstanter Druck vs. konstante Dicke) und die Holzspangrösse, wobei der Schwerpunkt auf dem E-Modul und der Bruchfestigkeit lag. Die Plattendichte erwies sich als der wichtigste Faktor zur Beeinflussung des E-Moduls. Wobei höhere Dichten durchweg zu einer höheren Steifigkeit führten. Dies unterstreicht die Bedeutung einer hohen Verdichtung der Holzpartikel während der Plattenherstellung zur Verbesserung der strukturellen Integrität. Darüber hinaus wirkte sich das Verhältnis der CNF-Zugabe erheblich auf die Bruchfestigkeit aus, wobei ein höheres Verhältnis mit einem verbesserten Widerstand gegen Biegekräfte korrelierte. Platten mit mittlerer Dichte (0,64 g/cm³ bis 0,80 g/cm³), bei denen grössere Partikel und ein höherer CNF-Gehalt verwendet wurden, wiesen die höchste Bruchfestigkeit auf.

Die Studie ergab, dass eine Erhöhung der Dichte und des CNF-Gehalts im Allgemeinen zu einer verbesserten mechanischen Festigkeit führte, die Beziehung jedoch nicht streng linear war. Eine optimale Leistung erfordert ein sorgfältiges Gleichgewicht dieser Faktoren während der Produktion. Ausserdem wirkte sich die Wahl des Pressverfahrens auf die Dichteverteilung innerhalb der Platten aus. Das Pressen mit konstanter Dicke führte zu einem U-förmigen Dichteprofil mit höheren Dichten an den Plattenoberflächen als im Kern, während das Pressen mit konstantem Druck Platten mit einem gleichmässigeren Dichteprofil über die gesamte Dicke ergab. Diese Dichteunterschiede beeinflussten die mechanischen Eigenschaften der Spanplatten erheblich, insbesondere den Wert für die Bruchfestigkeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse das Potenzial von CNF als biobasiertes Bindemittel für Spanplatten unterstreichen. Durch die Optimierung der Plattendichte, des CNF-Gehalts und des Pressverfahrens war es möglich, Spanplatten herzustellen, die die Standardanforderungen für E-Modul und Bruchfestigkeit erfüllen.

2.3.2 Holzwerkstoffe mit BNC als Bindemittel

In ihrer Studie untersuchten Yue et al. (2022) die Herstellung und Charakterisierung von Verbundwerkstoffen aus Holzpulver mit einer Partikelgrösse von 30-80 µm und bakterieller Cellulose. Die Aufschlammung wurde durch Dispergieren von 5 g Holzpulver in entionisiertem Wasser und anschliessendes Mischen mit einer BNC-Suspension mit unterschiedlichen BNC-Gehalten (6 % bis 33 %) hergestellt. Die Mischung wurde 45 Minuten lang bei Raumtemperatur mechanisch gerührt, dann eine Stunde lang stehen gelassen und unter vermindertem Druck filtriert. Die Aufschlammung wurde dann in eine Form gegeben und bei 80 °C im Ofen getrocknet. Während die Oberfläche des reinen Holzpulvers ungeordnet und locker war, wiesen die Holzpulver-BNC-Verbundwerkstoffe eine relativ flache, dichte und gleichmässig verteilte Morphologie auf. Mit zunehmendem BNC-Gehalt wurden die Prüfkörper flacher und dichter.

Die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe wurden durch Zugversuche gemessen. Holzpulver ohne BNC war leicht zerbrechlich. Die Zugfestigkeit der Verbundwerkstoffe nahm mit steigendem BNC-Gehalt deutlich zu und erreichte Werte von 81 ± 8 N/mm². Diese Verbesserung wurde auf die gleichmässige Einbettung des Holzpulvers in das BNC-Netzwerk zurückgeführt, das eine relativ isotrope und zähe Struktur bildete und die Spannungen gleichmässig verteilte. Die BNC war in der Lage, das Holzpulver effektiv zu binden. Um die Recyclingfähigkeit zu testen, wurden die Verbundwerkstoffe durch mechanisches Scheren in Wasser, Filtern und Trocknen recycelt. Es wurde festgestellt, dass die Verbundwerkstoffe ihre ursprünglichen guten mechanischen Eigenschaften auch nach drei Recyclingzyklen beibehielten, da sich das Holzpulver und BNC durch Wasserstoffbrückenbindungen in der wässrigen Dispersionslösung wieder zu einer dichten mehrschichtigen Struktur zusammenfügten. Wasserstabilitätstests, bei denen die Prüfkörper 50 Tage lang in Wasser gelagert wurden, zeigten, dass die Verbundwerkstoffe ihre Form behielten und nicht zerfielen. Der Nasszugversuch ergab einen Rückgang der

Zugfestigkeit von etwa 70 N/mm² auf etwa 30 N/mm². Die Wasseraufnahme nahm mit zunehmender Dichte und BNC-Gehalt ab.

Kadimaliev et al. (2015) stellte einen Bioklebstoff auf der Grundlage von Hefeabfällen aus der Bierherstellung her. Die Hefe wurde zunächst zentrifugiert und dann chemisch modifiziert, indem sie mit Natronlauge und Salzsäure behandelt wurde. Anschliessend wurden den modifizierten Hefeabfällen Glycerin und Borsäure zugesetzt, um sie in den Klebstoff zu integrieren. Darüber hinaus wurde getrocknete BNC auf Nano- und Mikrogrösse zerkleinert. Diese BNC wurde dann den modifizierten Hefeabfällen zugesetzt, um den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Das Bindemittel wurde mit Kiefern sägespänen (3-5 mm Spangrösse) gemischt und anschliessend heissgepresst, so dass überschüssige Feuchtigkeit verdampfte. Durch dieses Verfahren konnten die freien funktionellen Gruppen des Klebstoffs mit den Holzpartikeln reagieren und eine feste Struktur bilden. Es wurde festgestellt, dass sich die Zugfestigkeit der Platten nur geringfügig unterschied, unabhängig davon, ob 70 ml oder 90 ml des Klebstoffs verwendet wurden, aber die Zugabe von BNC führte zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. Auch die Wasserbeständigkeit wurde durch den Zusatz von BNC zum Bioklebstoff verbessert.

2.3.3 BNC in Verbundwerkstoffen

In Juntaro et al. (2007) wurde die Auswirkung einer Oberflächenmodifikation von Naturfasern auf die mechanische Leistungsfähigkeit von Verbundwerkstoffen untersucht. Die aus Hanf und Sisal bestehenden Naturfasern wurden mit BNC modifiziert. Die Ergebnisse zeigten, dass die mit modifizierten Sisalfasern verstärkten Verbundwerkstoffe eine deutliche Verbesserung der Zugfestigkeit aufwiesen. Sowohl die von den Fasern als auch die von der Fasermatrix dominierten Eigenschaften nahmen deutlich zu. Diese Verbesserung wurde auf die aufgeraute Faseroberfläche und die an der Faseroberfläche befindlichen Hydroxylgruppen der BNC zurückgeführt. Darüber hinaus trug das Nanocellulosematerial direkt zur Verstärkung der Verbundwerkstoffe bei. Mikroskopische Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) zeigten eine verbesserte Interaktion zwischen den modifizierten Naturfasern und der umgebenden Matrix, während bei den Verbundwerkstoffen mit unmodifizierten Fasern keine Faser-Matrix-Grenzfläche vorhanden war.

Mohammadkazemi et al. (2015) untersuchte das Potenzial von Fasern mit BNC-Beschichtung zur Verbesserung der mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften von Bagassefaser-Zement-Verbundwerkstoffen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Verbundwerkstoffe mit einem Fasergehalt von 6 Gew.-%, die mit BNC-beschichteten Fasern hergestellt wurden, verbesserte mechanische Eigenschaften aufwiesen. Die Beschichtung der Fasern mit BNC erhöhte die Anzahl der OH-Gruppen und steigerte die Oberflächenenergie, was die Wechselwirkung zwischen den Fasern und dem Zement verbesserte. Die starke Bindung wurde auf Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern oder zwischen den Fasern und der Zementmatrix zurückgeführt. Die Bruchfestigkeit, der Elastizitätsmodul und die Querkzugfestigkeit waren im Vergleich zu anderen Kombinationen erhöht. BNC bildete eine starke Schnittstelle mit dem Zement, was die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe verbesserte.

In Lee, Ho et al. (2012) wurde ein Vliesstoff aus Sisalfasern unter Verwendung von BNC als Bindemittel entwickelt. Die BNC verlieh dem Vliesstoff aufgrund der hohen Steifigkeit und Festigkeit des BNC-Netzwerks eine erhebliche mechanische Festigkeit. Die Vliesstoffe wurden mit akyliertem epoxidiertem Sojaöl (AESO) durch vakuumunterstützte Harzinfusion infiltriert und anschliessend thermisch ausgehärtet. Die Zug- und Brucheigenschaften der BNC-Sisal-Muster wiesen im Vergleich zum ursprünglichen Verbundwerkstoff deutliche Verbesserungen auf. BNC-Sisal-Vliesstoffe hatten eine Zugfestigkeit von 13,1 kNm⁻¹, während reine Sisalfaser-Vliesstoffe keine messbare Zugfestigkeit aufwiesen. Zugmodul und Zugfestigkeit der BNC-Sisal-Vliesstoffe stiegen im Vergleich zu reinen Sisalfaser-Vliesstoffen um 75 % bzw. 71 %. Bruchfestigkeit und E-Modul von BNC-Sisal-Vliesstoffen stiegen im Vergleich zu reinen Sisalfaser-Vliesstoffen um 142 % und 116 %. Zusammenfassend zeigte die Studie, dass die Verwendung von BNC als Bindemittel für Sisalfasern die mechanischen Eigenschaften und die Faser-Faser- und Faser-Matrix-Spannungsübertragung in den resultierenden Verbundwerkstoffen deutlich verbessert.

Lee, Shamsuddin et al. (2014) führten eine ähnliche Studie durch, bei der ein robuster Vliesstoff aus Sisalfaservlies unter Verwendung von BNC als Bindemittel hergestellt wurde. Zunächst wurde die feuchte BNC-Masse gemessen, getrocknet und erneut gewogen, um das Verhältnis zu bestimmen. 18 g trockene BNC wurden in Wasser hydratisiert und anschliessend in einem Mixer zu einer Suspension mit einer

Konzentration von 0,1 % BNC gemischt. 72 g lose Sisalfasern wurden auf 1-2 cm Länge geschnitten und über Nacht in der BNC-Suspension eingeweicht. Zur Herstellung des Vliesstoffs wurde die Suspension in eine Form gegossen, das Wasser abgelassen und die entstandene nasse Fasermatte durch Pressen mit Löschpapier entwässert. Anschliessend wurde der Vliesstoff in einer Heisspresse bei 120 °C getrocknet und verfestigt. Der fertige Vliesstoff wurde für die Herstellung von Verbundwerkstoffen verwendet. Dazu wurde der Vliesstoff in ein vakuumgestütztes Harzinfusionsgerät gelegt, mit Epoxidharz imprägniert und anschliessend bei 50 °C ausgehärtet. Die mechanischen Eigenschaften der resultierenden Verbundwerkstoffe zeigten deutliche Verbesserungen im Vergleich zu reinem PolyAESO und Sisalfaser-PolyAESO-Verbundwerkstoffen.

Die Bindungseigenschaften von CNF und Holzpartikeln wurden in zahlreichen Studien untersucht (Kojima, Kato et al. 2019; Kojima, Ishino et al. 2015; Amini et al. 2017; Hafez et al. 2020; Leng et al. 2017), während die Verwendung von BNC als Bindemittel für Holzpartikel nur in wenigen Studien untersucht wurde (Yue et al. 2022; Kadimaliev et al. 2015). BNC wird häufig als Verstärkung bei der Herstellung von klassischen faserverstärkten Verbundwerkstoffen verwendet (Juntaro et al. 2007; Nakagaito et al. 2005; Mohammadkazemi et al. 2015; Lee, Ho et al. 2012; Lee, Shamsuddin et al. 2014). Trotz einer ausführlichen Literaturrecherche konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass CNC als Bindemittel für Holzpartikel verwendet wird, obwohl sich die Eigenschaften von CNC nicht wesentlich von denen anderer Arten von Nanocellulose unterscheiden.

2.4 Mikroskopische Analyse der Bindungseigenschaften von Nanocellulose

Die Ergebnisse der mikroskopischen Bildanalyse in verschiedenen Studien deuten darauf hin, dass sowohl die CNF als auch die BNC an der Oberfläche der Fasern oder Partikel haften können. Die CNF haftet an der Oberfläche der Holzpartikel und verbindet sie miteinander. Diese Beobachtung kann sowohl bei einer gepressten Platte (Abb. 2) als auch bei Holzpartikeln gemacht werden, die nur mit CNF vermischt und bei Raumtemperatur getrocknet wurden (Abb. 3). Es wurde vermutet, dass kleine CNF-Teilchen in die Holzstruktur bzw. Poren eindringen können und so ein dreidimensionales Netzwerk bilden, das die Holzpartikel zusammenhält (Tayeb et al. 2018; Tajvidi et al. 2016).

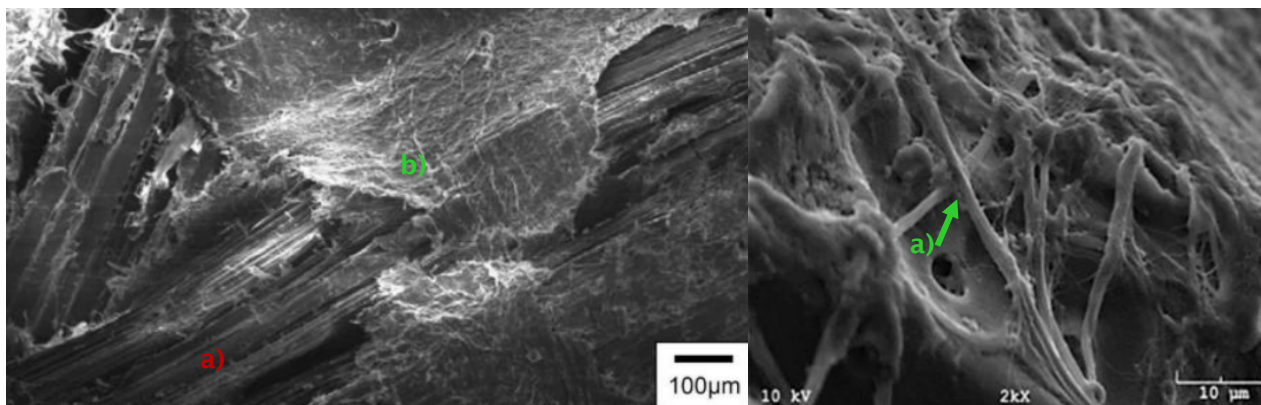


Abbildung 2: Holzpartikel a) mit CNF b) beschichtet (Kojima, Kato et al. 2019)

Abbildung 3: Holzpartikel mit CNF a) beschichtet mit einem Feststoffgehalt von 3 % (Tayeb et al 2018)

Es wurde beobachtet, dass einige CNF-Fibrillen in Plättchenform aggregieren, während andere Fibrillen isoliert bleiben. Um dies darzustellen, wurde ein Vergleich zwischen einem Holzpartikel, das nicht mit Cellulose bedeckt ist, und einem, das mit 3 % CNF benetzt ist, angestellt (Abb. 4).

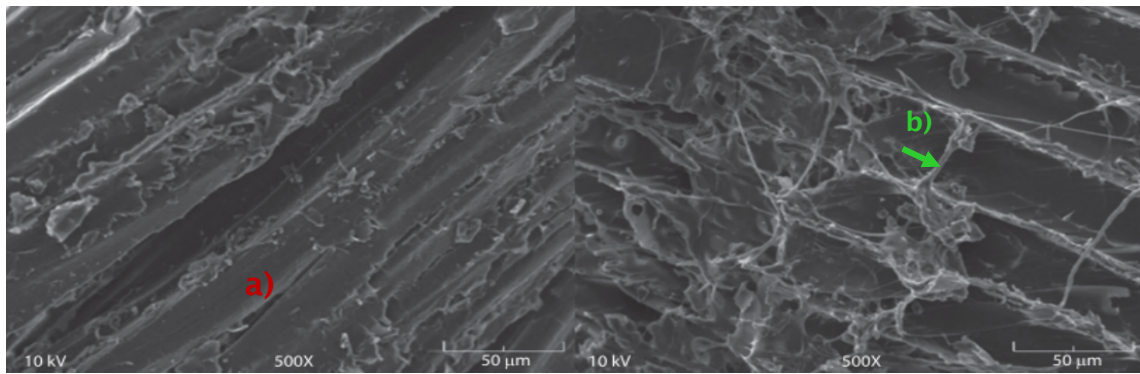


Abbildung 4: Kiefernholzpartikel a) unbeschichtet (links) und beschichtet mit CNF b) mit einem Feststoffgehalt von 3 % (Tajvidi et al. 2016)

Lee, Ho et al. (2012) verwendeten ein REM-Bild, um zu veranschaulichen, wie sich BNC zwischen Sisalfasern absetzt und diese miteinander verbindet (Abb. 5). Es wurde festgestellt, dass dies die mechanischen Eigenschaften des hergestellten Verbundwerkstoffs erhöht.

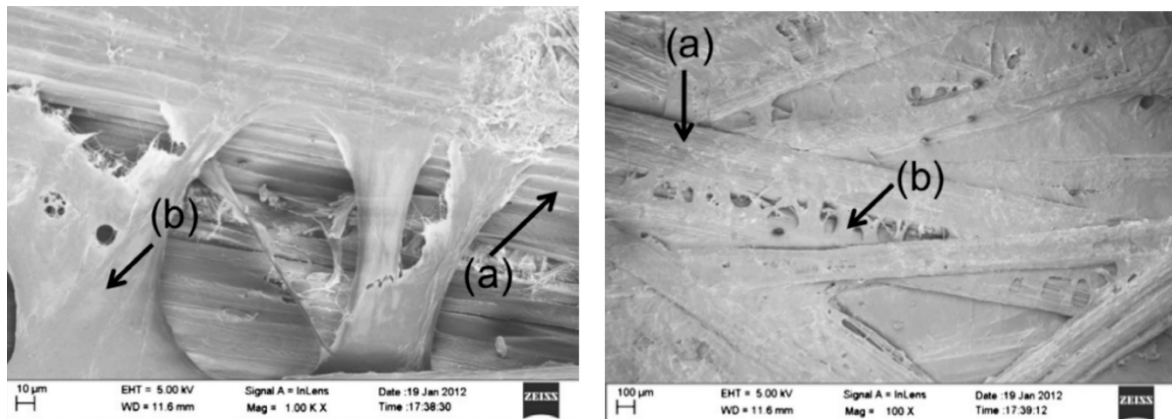


Abbildung 5: Sisalfaser (a), die über Wasserstoffbrückenbindungen mit BNC verbunden ist (b) (Lee, Ho et al. 2012)

In einer Reihe von Studien wurde mittels rasterelektronenmikroskopischer (REM) Bildanalyse nachgewiesen, dass die Nanocellulose eine Verbindung mit den Holzpartikeln eingeht. Es wurde postuliert, dass dies die Bindungseigenschaften zwischen den Partikeln oder Fasern fördert oder sogar allein für die Bindung verantwortlich ist, wenn Nanocellulose und Holzpartikel allein verwendet werden. Allerdings gibt es derzeit nur eine begrenzte Anzahl von mikroskopischen Aufnahmen, die die Benetzungs- und Bindungsprozesse zwischen Holzpartikeln und BNC dokumentieren.

2.5 Herstellungsprozess und -parameter

Das Herstellungsverfahren für BNC-Verbundwerkstoffe und CNF-gebundene Platten basiert im Wesentlichen auf der Vermischung von Holzpartikeln mit einer wässrigen Cellulosesuspension, die typischerweise einen Feststoffgehalt von weniger als 5 Gew.-% aufweist, was zu einer Pressmatte mit einem Feuchtegehalt von etwa 500 % führt. Anschliessend erfolgt eine Verdichtung unter mechanischem Druck und Temperatur. Die beheizte Presse wurde auf Temperaturen zwischen 120 °C und 185 °C eingestellt, wobei Temperaturen im Bereich von 180 °C am häufigsten verwendet wurden. Die Presszeit sowie der Druck waren abhängig von der Dicke der Prüfkörper und von der Temperatur der Presse (Kojima, Kato et al. 2019; Kadimaliev et al. 2015; Hafez et al. 2020; Amini et al. 2017; Leng et al. 2017). In der vorhandenen Literatur werden verschiedene Verfahren zur Herstellung von BNC-verleimten Platten beschrieben, die sich jedoch nicht wesentlich voneinander unterscheiden und in etwa dem in (Abb. 6) dargestellten Schema folgen. Der Mischvorgang dient dazu, die Cellulose (BNC oder CNF) gleichmässig auf der Oberfläche der Holzpartikel zu verteilen. Der Pressvorgang unter Hitze dient dazu, den Feuchtegehalt der nassen Pressmatte von etwa 500 % Pressmattenfeuchte auf etwa 10 % zu reduzieren, um so die Formation von Wasserstoffbrückenbindungen zu ermöglichen. Dieser Entwässerungsschritt ist von zentraler Bedeutung und stellt die grösste Herausforderung im Produktionsprozess dar (Hafez et al. 2020).

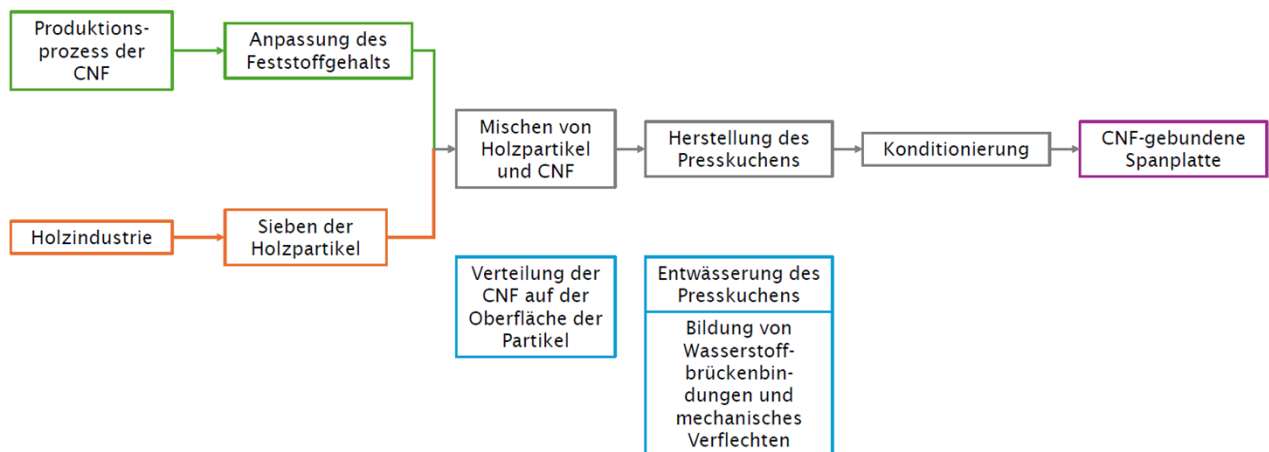


Abbildung 6: Schematischer Herstellungsprozess von CNF-Verbundwerkstoffen

Jüngste Fortschritte bei der Entwässerung von Nanocellulose haben gezeigt, dass Wasser ohne Wärmezufuhr entfernt werden kann. Diese Entwicklungen haben gezeigt, dass Wasser effektiv aus Nanocellulose extrahiert werden kann, wenn sie mit Holzpartikeln kombiniert wird, indem Druck bei Raumtemperatur angewendet wird. Diese Methode wurde von Amini et al. (2017) und Leng et al. (2017) angewendet, die mit CNF gebundene Spanplatten herstellten. Durch diesen Schritt wird der anfängliche Feuchtegehalt (Holzfeuchte) auf ca. 100 % gesenkt, was in den nachfolgenden Heisspresszyklen effektiv gehandhabt werden kann (Tajvidi et al. 2016). Die Trocknung des Gemischs mit einem Feuchtegehalt von ca. 100 % auf den Zielfeuchtegehalt von ca. 10 % kann jedoch nur durch die Zufuhr von Energie erreicht werden.

Die Herstellungsverfahren von CNF-gebundenen Platten und BNC-Verbundwerkstoffen unterscheiden sich nur durch zwei zusätzliche Schritte bei der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen. Erstens müssen die verbleibenden Bakterien und Produktionsrückstände von der BNC entfernt werden, und zweitens müssen die BNC-Filme in einem einfachen mechanischen Mischverfahren homogenisiert werden. In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Reinigung von BNC beschrieben worden. Ziel des Waschverfahrens für BNC ist es, Bakterien und andere nicht Cellulosehaltige Bestandteile wie Nukleinsäuren und Proteine von der Oberfläche zu entfernen, ohne die Netzwerkstruktur der bakteriellen Cellulose zu zerstören. Nach Nishi et al. (1990) löst NaOH die verbleibenden nichtcellulosehaltigen Bestandteile in BNC wirksam auf. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass höhere NaOH-Konzentrationen zur Entfernung grösserer Mengen dieser Bestandteile führt, was jedoch auch eine unerwünschte Veränderung der Kristallstruktur von BNC zur Folge hat, was wiederum zu schlechteren Eigenschaften des BNC führt.

Um die ideale Konzentration zu ermitteln, die BNC wirksam zu waschen und gleichzeitig die Cellulosestruktur zu erhalten, wurden in Han et al. (2019) verschiedene NaOH-Konzentrationen und ihre Auswirkungen untersucht. Es wurde festgestellt, dass das Waschen mit einer 3 %igen NaOH-Konzentration Bakterien wirksam entfernt, ohne die nanoskalige Struktur der Cellulose zu zerstören. Im Gegensatz dazu beschädigte eine 4 %ige Konzentration die Struktur, während eine 2 %ige Konzentration nicht ausreichte, um die Bakterien wirksam zu entfernen (Han et al. 2019). Nishi et al. (1990) untersuchte auch die Menge an nichtcellulosehaltigen Bestandteilen, die mit verschiedenen Konzentrationen von NaOH aus der BNC extrahiert werden konnten. Es wurde festgestellt, dass eine 8 %ige NaOH-Lösung die höchste Menge an extrahierten Bestandteilen ergab. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass eine 5 %ige NaOH-Lösung bereits zu einer Schädigung der BNC führte. Diese Daten bestätigen die Ergebnisse von Han et al. (2019), die darauf hinweisen, dass eine Schädigung der BNC-Struktur ab einer bestimmten NaOH-Konzentration (3 % in (Han et al. 2019) und > 5 % in (Nishi et al. 1990)) auftritt. Nakagaito et al. (2005) wendeten eine andere Waschtechnik an, bei der die BNC-Filme in Stücke von 80 mm x 100 mm geschnitten und 3 Stunden lang in einer 1 %igen NaOH-Lösung gekocht wurden, um die Zellfragmente zu entfernen. Es wurden jedoch keine weiteren Analysen zur Bewertung der Qualität des Waschverfahrens durchgeführt. S. Wang et al. (2018) verwendeten eine 2 %ige NaOH-Lösung zum Waschen der BNC, während Rozenberga et al. (2016) eine 4 %ige NaOH-Konzentration verwendeten. Es wurden jedoch weder detaillierte Informationen über den Waschprozess (Dauer, Temperatur) noch über die Qualität des Waschprozesses bereitgestellt. Klemm, Schumann et al. (2001) verwendeten zum Waschen der BNC

eine NaOH-Konzentration von 0,1 g/mol, was ungefähr einer 0,4 %igen Lösung entspricht. Nach dem Waschprozess wurde eine Verringerung der Verunreinigungen und auch eine Veränderung der Textur beobachtet (S. Wang et al. 2018).

Die genannten Waschprozesse wurden im Zusammenhang mit der Verwendung des BNC in der Medizintechnik vorgestellt, wobei ein hoher Reinheitsgrad des BNC von grosser Bedeutung ist. Aus der bestehenden Literatur geht jedoch nicht hervor, ob eine erhöhte BNC-Reinheit zu einer gesteigerten Fähigkeit zur Bindung mit Holzpartikeln aufgrund der Eliminierung von Produktionsrückständen oder Bakterien führt.

2.6 Bewertung des Recyclingpotenzials von Verbundwerkstoffen aus Nanocellulose

Die genannten Studien, in denen CNF als Bindemittel für Holzpartikel verwendet wird, berücksichtigen nicht das Recyclingpotenzial der hergestellten Verbundwerkstoff. Es wird lediglich das Wasseraufnahmeverhalten und die Dickenquellung beschrieben, was darauf hindeutet, wie diese mit Wasser interagieren (Kojima, Kato et al. 2019; Kojima, Ishino et al. 2015; Amini et al. 2017; Hafez et al. 2020; Leng et al. 2017). Die Studie Yue et al. (2022) ist die einzige, die das Recyclingpotenzial von BNC-gebundenen Spanplatten beschreibt. Der dabei beschriebene Recyclingprozess von Spanplatten, die mit BNC gebunden wurden, besteht hier aus drei Hauptschritten. Zunächst wird ein mechanischer Zerkleinerungsprozess durchgeführt, um das schnelle Eindringen von Wasser in das Material zu erleichtern. Anschliessend werden die entstandenen kleinen Fragmente in Wasser gerührt, um ihren Zerfall zu beschleunigen, so dass sich unter mechanischer Scherkraft ein BNC-Holzpulverschlämmling bildet. Anschliessend wird die BNC-Holzpulverschlämmling erneut mechanisch in Wasser gerührt und anschliessend gefiltert und getrocknet, wodurch die BNC-gebundene Spanplatte wiederhergestellt wird. Selbst nach drei Zyklen wiederholten Recyclings blieben die mechanischen Eigenschaften der BNC-gebundenen Spanplatten konstant. Es wird vermutet, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass das Holzmehl und die BNC in der wässrigen Dispersionslösung immer noch in der Lage sind, sich durch Wasserstoffbrückenbindungen wieder zu verbinden und eine isotrope, dichte, mehrschichtige Struktur zu bilden. Prüfkörper mit fünf verschiedenen BNC-Gehalten, die von 6,43 bis 59,9 Gew.-% reichten, wurden nach einem, zwei und drei Recyclingschritten auf Zugfestigkeit geprüft. Die Zugfestigkeit lag in einem Bereich zwischen 6 N/mm² und 65 N/mm², wobei keine erkennbaren Abweichungen über die Anzahl der Recyclingschritte hinweg zu verzeichnen waren.

2.7 Mögliche zukünftige industrielle Umsetzung der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen

2.7.1 Bestehende Sägewerkstrukturen und -prozesse

Teile der notwendigen Infrastruktur für eine mögliche industrielle Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen sind in einem Sägewerk bereits vorhanden. Die Produktionsschritte in einem Sägewerk werden durch den Stand der Technik und die Art des einzuschneidenden Holzes beeinflusst, weisen aber typischerweise nur geringe Variationen auf (Kiel et al. 2023). Zunächst werden die Stämme mit Rinde zum Sägewerk transportiert, wo sie zunächst auf dem Rundholzplatz gelagert und anschliessend entrindet werden. Die entrindeten Stämme werden dann einer Vorsortierung unterzogen, wobei die spezifische Sortierung der Stämme durch das vorgesehene Schnittbild bestimmt wird. Bei der anschliessenden Verarbeitung des Rundholzes zu Schnittholz fallen Nebenprodukte an, deren Form von der jeweiligen Sägewerkstechnologie abhängt. Zu diesen Nebenprodukten gehören Schwarten, Holzspäne und Sägemehl. In einigen Fällen werden die Brammen weiterverarbeitet, sodass Holzspäne entstehen. Ein Teil der Nebenprodukte, wird intern zur Erzeugung von Wärmeenergie für die Trocknung von Schnittholz, dem Hauptprodukt, verwendet. Ein weiterer Teil dieser Nebenprodukte wird an andere Industrien verkauft, darunter die Pelletindustrie sowie die Papier- und Zellstoffindustrie (Bundesamt für Statistik 2024). Anschliessend wird das Schnittholz nach Qualitäten sortiert und nach Grösse kategorisiert und verpackt. Die letzte Stufe des Prozesses ist die Vorbereitung des Produkts für den Transport zum Kunden, der in der Regel durch ein internes Logistiksystem organisiert wird (Karl Fronius 1982).

2.7.2 Perspektiven der industriellen Herstellung von bakterieller Nanocellulose

Die industrielle Produktion von BNC beinhaltet zwei Hauptherausforderungen: hohe Medienkosten bei vergleichsweise geringer Produktivität im industriellen Massstab. Diese Probleme machen die BNC-Produktion derzeit wirtschaftlich herausfordernd. Eine mögliche Lösung ist die Nutzung erneuerbarer Koh-

lenstoffquellen durch Optimierung des Bioprozesses, wodurch die Verwendung teurer kommerzieller Medien minimiert, und die Produktivität erhöht werden kann (Jang et al. 2017). Ein vielversprechender Ansatz ist die Umwandlung von Industrieabfällen, zuckerhaltigen Restströmen und Nebenprodukten in BNC. In verschiedenen Industriezweigen fallen täglich erhebliche Mengen an Abfällen an. Abfälle aus der Agrarindustrie eignen sich aufgrund ihrer grossen Verfügbarkeit und hohen Produktivität besonders gut für die BNC-Produktion. Siedlungsabfälle mit ihrem hohen Anteil an organischen Stoffen werden aufgrund der raschen Verstärkung, insbesondere in Entwicklungsländern, zu einer immer wichtigeren Biomassequelle (Hussain et al. 2019). Forscher nutzen zunehmend natürliche Abfallressourcen und verbesserte biologische Synthesemethoden, um BNC zu produzieren und eine „abfallfreie Gesellschaft“ und Wirtschaft zu fördern (Mateo et al. 2015).

Ein vielversprechender Ansatz zur Produktion von BNC ist die Fermentation von kostengünstigen Substraten und Abfällen aus der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und dem Brauereiwesen. Dies könnte die Produktionskosten senken und die Kommerzialisierung der BNC-Produktion vorantreiben. Abfälle, die keiner komplexen Vorbehandlung, Entgiftung oder Ergänzung bedürfen, könnten der Schlüssel zur Senkung der Produktionskosten und zur Verbesserung der Effizienz sein. BNC, das aus Abfallmedien hergestellt wird, hat oft ähnliche physikalisch-chemische Eigenschaften und einen höheren Ertrag als BNC aus Standardmedien. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die industrielle Produktion von BNC vielversprechend ist, insbesondere wenn kostengünstige Abfallmedien verwendet werden. Es sind jedoch weitere Schritte erforderlich, um die Produktion von BNC in grossem Massstab rentabel zu machen (Hussain et al. 2019).

2.7.3 Potenzieller Herstellungsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen

Wie in verschiedenen Studien beschrieben (Amini et al. 2017; Yue et al. 2022), ist der Herstellungsprozess von BNC-Holz-Verbundwerkstoffen relativ simpel und erfordert im Allgemeinen lediglich BNC und Holzspäne als Ausgangsstoffe. Vor der Verarbeitung muss die BNC einem Waschprozess mit NaOH unterzogen werden, gefolgt von der Homogenisierung. Die Holzspäne müssen bei Bedarf gesiebt werden, um die Partikel in verschiedene Fraktionen aufzuteilen. Anschliessend werden die Holzspäne mechanisch mit der homogenisiertem BNC vermischt. In der ersten Herstellungsphase werden die mit BNC beschichteten Holzpartikel, die aus dem Mischprozess hervorgehen, in eine beheizte Presse gegeben. Durch die Anwendung von mechanischem Druck und Wärme wird der zunächst sehr feuchten Pressmatte das Wasser entzogen. Durch den Pressvorgang, bei dem die nasse Matte aus BNC und Holzpartikeln auf einen Feuchtegehalt von ca. 10 % getrocknet wird und die Holzpartikel durch Wasserstoffbrückenbindungen mit dem BNC verbunden werden, entsteht der formstabile BNC-Verbundwerkstoff. Darüber hinaus muss der BNC-Verbundwerkstoff möglicherweise konditioniert, zugeschnitten, verpackt und transportiert werden.

2.8 Produktions- und Rohmaterialkosten für BNC-Verbundwerkstoffe und Spanplatten

Derzeit ist die Herstellung von BNC-gebundenen Werkstoffen auf den Labormassstab beschränkt, was eine genaue Kostenabschätzung für die industrielle Produktion schwierig macht. Aus diesem Grund wurde die prozentuale Aufteilung der Kosten bei der Herstellung von Spanplatten als Referenz herangezogen, da davon auszugehen ist, dass diese der potenziellen industriellen Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen ähnlich ist. Poppensieker (2010) entwickelte in seiner Studie ein detailliertes Kostenmodell für die Produktion von Spanplatten, das auf realen Produktionsdaten und Expertenwissen aus der Holzwerkstoffindustrie basiert. Ziel war es, die Herstellungskosten genau zu analysieren und Einblicke in die Kostenstruktur zu gewinnen, indem die Auswirkungen von gezielten Änderungen der Produktionsparameter und Rohstoffkosten untersucht wurden. Das Modell berücksichtigt eine bestehende Anlage für 19 mm dicke Spanplatten mit einer Dichte von ca. 600 kg/m³ bei einer Kapazität von ca. 1500 m³ pro Tag. Es wurde ein spezifisches Produktionsprofil definiert, das sowohl die technologischen Eigenschaften der Spanplatten als auch die genauen Mengen und Arten der verwendeten Rohmaterialien enthält. Dadurch konnten Materialverbrauch und Betriebskosten genau ermittelt werden.

Die Untersuchung konzentrierte sich auf die verschiedenen Kostenarten, die sowohl feste als auch variable Kosten umfassten. Zu den Fixkosten gehören die Abschreibung der Anlagen und die Arbeitskosten, die unabhängig von der Produktionsmenge linear berechnet wurden. Die variablen Kosten, zu denen Rohmaterialien (Holz, Bindemittel, Zusatzstoffe), Energiekosten (elektrische und thermische Energie) und Wartungskosten gehören, waren direkt von der Produktionsmenge abhängig und wurden ent-

sprechend in das Modell integriert. Ein wesentlicher Aspekt der Analyse war die prozentuale Aufteilung der Kosten. Die Analyse der Kostenstruktur ergab, dass die Rohmaterialkosten mit einem Anteil von 61 % den Grossteil darstellen. Dabei hatte das Holz als Hauptbestandteil mit 44 % den grössten Anteil an den Kosten. Die Kosten für Bindemittel lagen bei 17 %. Energiekosten, insbesondere für elektrische Energie mit 16 %, und Kapitalkosten durch Abschreibungen mit 13 % trugen ebenfalls wesentlich zur Gesamtkostenstruktur bei. Die restlichen Kosten entfallen auf Personal (6 %) und Instandhaltung (4 %). Darüber hinaus wurde der spezifische Energiebedarf der Produktionsprozesse analysiert, wobei sowohl die elektrische als auch die thermische Energie berücksichtigt wurden. Die elektrische Energie wurde zu einem Preis von 9 Cent pro kWh eingekauft, während die thermische Energie weitgehend kostengünstig aus der Verbrennung von Produktionsabfällen gewonnen wurde. Zusammenfassend liefert diese Studie ein fundiertes Kostenmodell für die Produktion von Spanplatten, das auf der Basis aktueller Preise erstellt wurde.

Im Gegensatz dazu wird BNC derzeit in lediglich im kleinem industriellem Massstab bzw. im Pilotmassstab hergestellt. Es wird erwartet, dass die Produktion von BNC in bestimmten Anwendungen eine wettbewerbsfähige Alternative zu pflanzlichen Cellulosenanofasern sein kann (Zhong 2020), da bei der kommerziellen Fermentation landwirtschaftliche und industrielle Abfälle verwendet werden, was die Produktionskosten senkt (Hussain et al. 2019). Laut Cowie et al. (2014) werden die zukünftigen Kosten für die industrielle Produktion von BNC zwischen 2 CHF/kg und 5 CHF/kg liegen. Optimistischere Schätzungen der Treeless AG gehen jedoch von Produktionskosten zwischen 1 CHF/kg und 3 CHF/kg aus.

Die Kosten für Sägespäne sind aufgrund saisonaler und marktbedingter Faktoren starken Schwankungen unterworfen. Der Durchschnittspreis für trockene Sägespäne wurde mit 57,5 CHF/t ermittelt. Die Daten wurden den durchschnittlichen Marktpreisen der OLWO AG entnommen.

2.9 Umweltauswirkungen bei der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen und Spanplatten

In Forte et al. (2021) wurde eine Ökobilanz für die Produktion von BNC unter statischen Kulturbedingungen nach einem Cradle-to-Gate-Ansatz durchgeführt. Die funktionelle Einheit wurde definiert als 1 kg BNC (Trockenmasse) in 138,8 kg Wasser mit einem Feststoffgehalt von 0,72 %. Die Ökobilanz umfasste die Material- und Energieströme aus der Gewinnung natürlicher Ressourcen für die Herstellung von BNC, einschliesslich der Behandlung und Entsorgung von Abfällen, die während der BNC-Prozesskette entstehen.

Der BNC-Produktionsprozess umfasste mehrere wichtige Schritte, beginnend mit der Vorbereitung und Pasteurisierung des Kulturmediums, gefolgt von der „Inokulumvermehrung“, die in der Regel durch eine sukzessive Vermehrung der Biomasse im Verhältnis 1:10 (Biomasse/Kulturmedium) erfolgt. Der nächste Schritt des BNC-Produktionsprozesses umfasst die Hauptphase der statischen Kulturfermentation, die unter statischen Bedingungen in einem Raum bei 30°C für 7 Tage durchgeführt wird. Der letzte Schritt, der in der Ökobilanz berücksichtigt wurde, war der nachgelagerte Prozess, der die Reinigung der BNC umfasste, einschliesslich des Waschens mit Natriumhydroxid und Wasser und der Verpackung in Kunststoffbehälter und Kartons. Die geplante Anlage war in der Lage, 60.000 Liter Nährmedien pro Monat zu verarbeiten und 420 kg trockene BNC pro Monat zu liefern, was 5 Tonnen pro Jahr entsprach.

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie zeigten, dass Wasser mit einem Gesamtverbrauch von 36,1 Tonnen pro Kilogramm produziertem BNC die am meisten verbrauchte Ressource ist. Es ist erwähnenswert, dass 98 % dieses Wassers gereinigt und wiederverwendet werden konnten. Das meiste Wasser wurde für die Herstellung von Rohstoffen verwendet, wofür 17,8 Tonnen Wasser pro kg BNC benötigt wurden. Ein erheblicher Teil davon wurde für die Herstellung von Kartonverpackungen, Rohstoffen für Nährböden und Natriumhydroxid zum Waschen von BNC verwendet. Die Fermentation und die nachgelagerten Prozesse verbrauchten mit 3,9 bzw. 7,7 Tonnen pro kg BNC zusätzliches Wasser. Da Wasser die wichtigste verwendete Ressource im Produktionsprozess war, war der Einfluss des Wasserverbrauchs auf das Treibhauspotenzial (THP) jedoch vernachlässigbar. Weitere Ergebnisse zeigten, dass die Produktion von Rohstoffen in mehreren Kategorien den grössten Beitrag zu den Umweltauswirkungen leistete, während der eigentliche Betrieb der BNC-Produktion nur geringe Auswirkungen hatte. Allerdings musste das anfallende Abwasser aufbereitet werden, was zu einer zusätzlichen Umweltbelastung durch die kommunale Kläranlage führte. Die wichtigsten Wirkungskategorien waren „Klimawandel“, „Erschöpfung fossiler Ressourcen“, „Humantoxizität, nicht krebserregend“ und „terrestrische Toxizität“. Unter den Rohstoffen hatte die Herstellung von Natriumdihydrogenphosphat, das im Kulturmedium verwendet

wird, die grössten Auswirkungen, insbesondere in den Kategorien „Humantoxizität, nicht krebserregend“ und „terrestrische Toxizität“, gefolgt von der Herstellung von Maissirup für die Medien und Kartonverpackungen. Das Gesamt-THP für die Herstellung von 1 kg BNC (Trockenmasse) in 138,8 kg Wasser mit einem Feststoffgehalt von 0,72 % betrug 16,1 kgCO₂eq.

Die Produktion von Rohstoffen hatte mit 44 % der Gesamtauswirkungen den grössten Einfluss auf das THP. Nachgelagerte Prozesse, zu denen das Mahlen, Waschen, Pasteurisieren und Verpacken gehörten, machten 17 % des gesamten THP aus. Die Fermentation in statischen Kulturen trug 16 % bei, während die Abwasserbehandlung 10 % der Emissionen ausmachte. Es wurde festgestellt, dass das THP in erster Linie vom Energieverbrauch beeinflusst wird. Der Energieverbrauch für die Kulturfermentation, das Mahlen der Cellulose und die Inokulumvermehrung machte etwa drei Viertel des Gesamtenergieverbrauchs aus, wobei jeder Prozess etwa ein Viertel beitrug. Der Cellulosewaschprozess wurde als nächstgrösster Energieverbraucher identifiziert, der 14 % zum Gesamtenergieverbrauch beitrug.

Araújo e Silva et al. (2020) untersuchte ebenfalls die Umweltauswirkungen der Herstellung von BNC und berichtete über ein THP von 13,1 kgCO₂eq pro kg trockenes BNC, was sich nicht wesentlich von den in Forte et al. (2021) berichteten Werten unterscheidet.

Der Prozess „Particle board, for indoor use RER- particle board production, for indoor use - Cut-off, U“ aus der Ecoinvent-Datenbank 3 wurde verwendet, um das THP für die Produktion von 1 m³ Spanplatten für Innenanwendungen zu analysieren. Das THP für 1 m³ Spanplatten beträgt 205 kgCO₂eq., wobei der grösste Anteil von 40 % auf das als Bindemittel verwendete Harnstoff-Formaldehyd-Harz (83 kgCO₂eq.) entfällt. Auch der Rohstoff Holz hat mit 30 % einen erheblichen Anteil an den Emissionen. Zusammen tragen diese Rohstoffe zu fast drei Vierteln der Gesamtemissionen bei. Die restlichen 30 % entfallen auf das THP der während des Produktionsprozesses verwendeten Energie, die sich auf thermische Energie zum Beheizen der Presse und elektrische Energie aufteilt. Auf die thermische Energie entfallen etwa 20 % des gesamten THP, während die elektrische Energie etwa 10 % beiträgt.

3 Material und Methoden

3.1 Vorbereitung der BNC

3.1.1 Waschen

Die von der Treeless AG gelieferte bakterielle Cellulose in Form von dicken Filmen wurde gewaschen, um Verunreinigungen zu entfernen. Dazu wurde die BNC mehrere Minuten lang unter Wasser gespült, um alle Oberflächenrückstände zu entfernen. Zusätzlich wurde die BNC mit unterschiedlichen Konzentrationen von Natriumhydroxid (NaOH) für unterschiedliche Zeit gewaschen und anschliessend erneut mit fliessendem Wasser gespült, bis das Wasser klar war. Um den Einfluss des Waschprozesses auf die mechanischen Eigenschaften zu erhalten, wurden verschiedene Waschprozesse durchgeführt.

Waschansatz 1: 0 % NaOH bei 20 °C gewaschen

Waschansatz 2: 0,4 % NaOH bei 90 °C für 90 min

Waschansatz 3: 3 % NaOH bei 20 °C für 90 min

Waschansatz 4: 6 % NaOH bei 20 °C für 90 min

Waschansatz 5: 3 % NaOH bei 80 °C für 45 min

Waschansatz 6: 3 % NaOH bei 20 °C 90 min (BNC wurde vor dem Waschen homogenisiert)

Waschansatz 7: 1% NaOH bei 20 °C für 24 h



Abbildung 7: Spülen der BNC-Filme mit Wasser

3.1.2 Homogenisierung

Um eine Homogenisierung der BNC-Filme für die weitere Verarbeitung zu erreichen, wurden sie manuell mit einem Küchenmixer (Primoteq SM 933 Set) mit einer Dauer von 10 Minuten pro Liter püriert. Durch diese mechanische Zerkleinerungsmethode wurde die BNC in eine homogene Masse versetzt.

3.1.3 Entwässerung und Bestimmung des Feststoffgehalts der BNC

Die BNC der Treeless AG wies in der Regel einen Feststoffgehalt von ca. 2 % auf. Für bestimmte Prüfungen war jedoch ein höherer Feststoffgehalt erforderlich. Um den Feststoffgehalt der homogenisierten BNC-Masse zu erhöhen, wurde sie in Behältern ausgebreitet und im Ofen bei 95 °C getrocknet. Die Trocknungsdauer variierte je nach gewünschtem Feststoffgehalt und reichte von ca. 30 min bis 150 min. Um eine gleichmässige Trocknung zu gewährleisten und eine Trocknung an der Oberfläche zu verhindern, wurde das ausgebreitete Material regelmässig umgerührt. Anschliessend wurde die Masse nochmals homogenisiert und bei 4 °C bis zur Verwendung gelagert.

Zur Quantifizierung des Feststoffgehalts der homogenisierten BNC wurden zunächst drei Prüfkörper gewogen und anschliessend 24 Stunden lang im Ofen bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschliessend wurden die Prüfkörper erneut gewogen. Der Feststoffgehalt wurde dann wie folgend berechnet:

$$\text{Feststoffgehalt [\%]} = \left(\frac{\text{Gewicht der trockenen Komponente}}{\text{Gesamtgewicht}} \right) \times 100$$



Abbildung 8: Homogenisierte BNC

3.2 Vorbereitung der Holzpartikel

Für die Versuche wurden Sägespäne verwendet, die von der OLWO AG in Bern gekauft wurden. Nach Angaben des Sägewerks bestehen die Sägespäne zu 95 % aus Fichtenholz. Um die Weiterverarbeitung zu erleichtern, wurden die Sägespäne zunächst in einer Ruefly-Trockenkammer auf eine Holzfeuchte von etwa 10 % getrocknet. Der Feuchtegehalt wurde regelmässig überwacht, um sicherzustellen, dass der gewünschte Wert erreicht wurde. Danach wurden die Sägespäne mit einer Prüfsiebmaschine (Haver EML 400) gesiebt. Für jede Siebung wurden 500 g der getrockneten Sägespäne verwendet. Die Vibrationsintensität wurde auf Stufe 4 eingestellt, und auch das Intervall wurde auf Stufe 4 festgelegt. Die Siebung wurde in jedem Durchgang 4 Minuten lang durchgeführt. Es wurden drei Siebgrößen verwendet (1 mm, 2,8 mm und 5 mm Maschenweite), um drei verschiedene Siebfractionen zu erzeugen. Die erste Fraktion umfasste Holzpartikel mit einer Grösse von 0 mm bis 1 mm, die zweite Siebfraction enthielt Holzpartikel mit einer Grösse zwischen 1 mm und 2,8 mm, und die dritte Fraktion enthielt Holzpartikel > 2,8 mm. Anschliessend wurden aus den oben genannten Siebfractionen und einer Mischung davon Prüfkörper hergestellt, um deren Eigenschaften zu untersuchen und zu analysieren, wie sich die Partikelgrösse auf den Verbundwerkstoff auswirken. Die gesiebten Sägespäne wurden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % und einer Temperatur von 20 °C gelagert. Der Feuchtegehalt des Holzes erreichte somit etwa 10 %.

3.3 Herstellung der Werkstoffmuster

In mehreren Versuchsreihen wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Platteneigenschaften untersucht. Alle Werkstoffmuster wurden auf einer Lindenbergl Simatic HMI Presse hergestellt. Zunächst wurden Vorversuche durchgeführt, um erste Erfahrungen zu sammeln und die Produktions- und Pressparameter wie Presstemperatur, Presszeit, Pressdruck, Feuchtegehalt, Solldichte und -dicke, BNC-Gehalt und eine geeignete Partikelgrösse für die Sägespäne zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde eine selbstgebaute Pressform aus Aluminium mit den Massen 60 mm x 60 mm x 3 mm verwendet. Damit konnten einige Parameter bestimmt und ihr Einfluss auf die Eigenschaften grob abgeschätzt werden. Für alle weiteren Versuche wurde eine selbstgebaute, höhenverstellbare Aluminiumpressform mit den Massen 230 mm x 170 mm verwendet.

Der Aluminiumpressenrahmen wurde zwischen zwei Heizplatten mit einer Temperatur von 150 °C positioniert. Während des Pressvorgangs wurde ein Drittel der gesamten Presszeit zum Vorpressen genutzt, wobei die Presse in kleinen Schritten bis zu einem Zieldruck von 150 bar geschlossen wurde. Für die restliche Presszeit wurde der Druck dann auf 210 bar erhöht, um sicherzustellen, dass die Heizplatte den Rahmen der Form erreicht und somit die gewünschte Dicke der Prüfkörper gewährleistet werden kann. Dies entsprach einem Pressverfahren mit konstanter Dicke. Die Solldicken für alle Prüfkörper

wurden auf 2,6 mm und im weiteren Verlauf auf 4,4 mm festgelegt, da ab einer Dicke von 3 mm ausagekräftigere Ergebnisse für die Biegesteifigkeit messbar sind. Die Dicke der Muster wurde durch die Einstellung der Höhe des Pressenrahmens mit Hilfe zusätzlicher Metallplatten gesteuert. Die Dichte der Muster wurde durch Anpassung der Menge an Sägespänen und BNC variiert. Das Pressprinzip (Pressen mit konstanter Dicke) und die eingestellte Temperatur blieben während der Versuche konstant. Die Presszeit wurde jedoch an die spezifischen Eigenschaften der Muster, wie Feuchtegehalt und Dichte, angepasst, um einheitliche und zuverlässige Testbedingungen zu gewährleisten.



Abbildung 9: Schritte zur Herstellung und Recycling von BNC-Verbundwerkstoffen

3.3.1 Bewertung der Prozessstabilität

Um Ungenauigkeiten und Schwankungen während des Pressvorgangs zu ermitteln, wurde zunächst die Stabilität des Prozesses bestimmt. Dazu wurden sieben Prüfkörper mit konstanten Kontrollvariablen hergestellt: Die BNC stammte aus der gleichen Charge, es wurden die gleichen Solldichten, Solldicken, Partikelgrößen, BNC-Gehalte und Pressparameter (Temperatur, Zeit, Druck usw.) angestrebt. Diese Prüfkörper wurden dann auf Dicke, Dichte und Querkzugfestigkeit geprüft.

Mit der Gewissheit der Prozessstabilität beim Pressen wurden die folgenden Variablen und ihr Einfluss auf die Eigenschaften der Prüfkörper, insbesondere auf die Querkzugfestigkeit, untersucht:

1. Waschansätze (Ansatz 1-7)
2. Verhältnis von BNC zu Holzspänen
3. unterschiedliche Dichten
4. unterschiedliche Partikelgrößen
5. Feuchtegehalt der Pressmatte
6. unterschiedliche Materialkonzepte: Dicken, Dichten und Partikelgrößen

3.3.2 Beschreibung der Variablen und Produktionsparameter

1. Für jeden Waschansatz (Waschansatz 1-7) wurde ein Werkstoffmuster hergestellt, um den Einfluss des Waschens von BNC auf die Querkzugfestigkeit zu bewerten. Der BNC-Gehalt der Platten betrug 10 Gew.-% bei einer Solldichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$. Der Feuchtegehalt des Presskuchens lag zwischen 200 % und 600 %, während der Feststoffgehalt der BNC etwa 2-3 % betrug. Die Partikelgröße der Sägespäne entsprach der Siebfraktion von 0 mm bis 2,8 mm und die Presszeit betrug 15 min.
2. Um den Einfluss des BNC-Gehalts auf die Querkzugfestigkeit zu bewerten, wurde eine Reihe von Werkstoffmustern hergestellt, die jeweils einen unterschiedlichen Anteil an BNC enthielt.

ten. Die Prüfkörper wurden mit einem BNC-Gehalt von 10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-% hergestellt. Der Feststoffgehalt betrug 2,7 %, 4,1 % bzw. 5,6 %. Die Solldichte betrug $0,7 \text{ g/cm}^3$, der Feuchtegehalt der Pressmatte lag bei 438 %. Die Presszeiten für diese BNC-Verbundwerkstoffe betragen 15 min, 14,5 min bzw. 14 min.

3. Um den Einfluss unterschiedlicher Dichten auf die Querkzugfestigkeit des BNC-Verbundwerkstoffs zu bewerten, wurden Werkstoffmuster mit drei unterschiedlichen Dichten hergestellt. Die Solldichten der Werkstoffmuster betragen $0,7 \text{ g/cm}^3$, $0,55 \text{ g/cm}^3$ bzw. $0,45 \text{ g/cm}^3$. Alle Prüfkörper wurden mit einem BNC-Gehalt von 10 Gew.-% hergestellt, während der Feuchtegehalt der Prüfkörper 438 % betrug. Der Feststoffgehalt der drei Werkstoffmuster betrug 2,65 %, 2,65 % bzw. 2,29 %, während die Partikelgrösse von 0 mm bis 2,8 mm reichte und die Presszeit 15 min, 15 min und 12,3 min betrug.
4. Um die Auswirkungen der Partikelgrösse auf die Querkzugfestigkeit des BNC-Verbundwerkstoffs zu beurteilen, wurden Werkstoffmuster mit unterschiedlichen Partikelgrössen hergestellt. Ein Werkstoffmuster wurde mit Partikelgrössen von 0-1 mm hergestellt, während das andere mit Partikeln der Grösse von 1-2,8 mm hergestellt wurde. Alle anderen Pressparameter, einschliesslich des BNC-Gehalts (10 Gew.-%), der Solldichte ($0,7 \text{ g/cm}^3$), des Feuchtegehalts des Presskuchens (600 %), des Feststoffgehalts des BNC (1,78 %) und der Presszeit (15 Minuten), wurden während des gesamten Versuchs konstant gehalten.
5. Als weiterer Prüfparameter wurde der Einfluss des Feuchtegehalts der Pressmatte auf die Querkzugfestigkeit des BNC-Verbundwerkstoffs untersucht. Zu diesem Zweck wurden fünf Werkstoffmuster mit unterschiedlichen Feuchtegehalten von 600 %, 400 %, 300 %, 200 % bzw. 150 % hergestellt. Der Feuchtegehalt wurde gesteuert, indem der Feststoffgehalt der BNC auf 1,78 %, 2,65 %, 3,5 %, 5,16 % und 6,77 % und damit die Wassermenge in der Pressmatte eingestellt wurde. Der BNC-Gehalt aller fünf Muster betrug 10 Gew.-%, die Solldichte blieb unverändert bei $0,7 \text{ g/cm}^3$, ebenso wie die Partikelgrösse von 0-2,8 mm.
6. Darüber hinaus wurden Materialparameter ausserhalb der üblichen Grenzen untersucht, insbesondere Dichten, Spangrössen und Dicke der Muster wurden extrem variiert. Es wurden zwei verschiedene Materialkonzepte untersucht, ein Werkstoffmuster mit hoher Dichte (HD) und geringer Dicke und zwei Muster mit niedriger Dichte (LD) und hoher Dicke. Das hochverdichtete Werkstoffmuster wurde mit einem BNC-Gehalt von 15 Gew.-%, einer Solldichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$, einer Dicke von 2,6 mm und einer der Siebfraktion entsprechenden Spangrösse von 0-1 mm hergestellt. Die Muster mit niedriger Dichte wurden mit einem BNC-Gehalt von 10 Gew.-%, einer Solldichte von $0,45 \text{ g/cm}^3$ und $0,2 \text{ g/cm}^3$, einer Dicke von 10 mm und einer Partikelgrösse von 1-2,8 mm hergestellt. Der Feuchtegehalt der Pressmatte betrug bei allen drei Mustern 600 %, während der Feststoffgehalt zwischen 2,8 %, 2,2 % und 2,0 % variierte. Ausserdem wurde die Presszeit an die Dichte der Werkstoffmuster angepasst und betrug 15 bzw. 35 Minuten.

Tabelle 2: Übersicht und detaillierte Informationen zu den Produktionsparametern und angewandten Variablen

	BNC-Gehalt [Gew.-%]	Solldichte [g/cm ³]	Feuchtegehalt [%]	Feststoff- gehalt der BNC [%]	Partikel- grösse [mm]	Presszeit [min.]
0. Standard-BNC-Verbundwerkstoff	10	0,7	600	1,78	0-2,8	15
1. Waschansatz	10	0,7	200-600	2-3	0-2,8	15
2. BNC-Gehalt	10; 15; 20	0,7	400	2,7; 4,1; 5,6	0-2,8	15; 14,5; 14
3. Dichte	10	0,7; 0,45	438	2,65; 2,29	0-2,8	15; 12,3
4. Partikelgrösse	10	0,7	600	1.78	0-1; 1-2,8; >2,8	15
5. Feuchtegehalt	10	0,7	150; 200; 300; 400; 600	1,78; 2,65; 3,5; 5,16; 6,77	0-2,8	15; 12,5; 10; 7,5
6. Dicke, Dichte, Partikelgrösse	15; 10	0,7; 0,45; 0,2	600	2,8; 2,2; 2,0	0-1; 1-2,8	15; 35

3.3.3 Herstellung des Verbundwerkstoffes und Pressverfahren

Zur Herstellung der Pressmatte wurden die entsprechende Menge getrockneter und gesiebter Sägespäne und die entsprechende Menge homogener und gewaschener BNC mit dem gewünschten Feststoffgehalt in ein Kunststoffgefäss gegeben. Die beiden Teile wurden dann mit einem Küchenmixer 120 Sekunden lang bei mittlerer Intensität gemischt, um die BNC gleichmässig auf der Holzoberfläche der Sägespäne zu verteilen. Im nächsten Schritt wurde die gemischte Masse in die vorbereitete Aluminiumform gegossen. Auf beiden Seiten wurde ein feines Metallsieb mit einer Maschenweite von 0,05 mm x 0,03 mm aufgelegt. Ausserdem wurde ein Lochblech verwendet, auf das eine Metallplatte mit Rippen gelegt wurde. So konnte das in der Pressmatte enthaltene Wasser während des Pressvorgangs ablaufen. Mit einem Spatel wurde die Masse in der Form verteilt. Dieser Aufbau wurde dann in die Presse gelegt und die entsprechenden Pressparameter wurden eingestellt. Überschüssiges Wasser, das während des Pressvorgangs aus der Pressmatte kam, wurde mit Papiertüchern aufgenommen.

Am Ende des Presszyklus wurde die Form aus der Presse genommen. Die beiden Lochbleche und die Metallsiebe wurden von der Oberfläche des BNC-Verbundwerkstoffes entfernt. Anschliessend wurde das Werkstoffmuster gewogen, beschriftet und zum Abkühlen senkrecht gestellt. Danach wurde der BNC-Verbundwerkstoff vor der weiteren Verarbeitung mindestens 24 Stunden lang bei 65 % Luftfeuchtigkeit und 20 °C gelagert.

3.3.4 Bestimmung des Feuchtegehalts der Pressmatte

Um den Holzfeuchtegehalt während des Pressvorgangs zu erfassen und die Menge des mechanisch ausgepressten und die Menge des durch Wärmezufuhr verdunsteten Wassers zu ermitteln, wurden zwei Standard-BNC-Verbundwerkstoffe (Tabelle 2) mit gleichen Materialmengen hergestellt. Eine davon wurde mit einem Heisspressen nach dem im Kapitel 3.3 beschriebenen Verfahren hergestellt. Die zweite wurde nach demselben Verfahren hergestellt, mit dem Unterschied, dass die Presse nicht beheizt wurde, sondern nur mechanischer Druck ausgeübt wurde. Die Temperatur der Presse wurde auf 20 °C eingestellt. Die BNC-Verbundwerkstoffe wurden vor (Anfangsgewicht) und nach (Endgewicht) dem Press-

vorgang gewogen. Da die anderen Pressparameter (Druck und Zeit) mit Ausnahme der Temperatur konstant gehalten wurden, stellt der Unterschied im Endgewicht zwischen Verbundwerkstoff 1 und Verbundwerkstoff 2 die während des Pressvorgangs bei Erwärmung verdampfte Wassermenge dar.

3.4 Bewertung und Verfahren zur Beurteilung des Recyclingpotenzials

Um den Einfluss verschiedener Recyclingschritte auf die Querkzugfestigkeit und Biegesteifigkeit zu untersuchen, wurden mehrere Werkstoffmuster mit konstanten Prozessparametern hergestellt. Es wurde ein BNC-Gehalt von 10 %, eine Solldichte von 0,7 g/cm³ und eine Pressmattenfeuchte von 600 % angestrebt. Der BNC-Feststoffgehalt lag bei 1,78 % und die Partikelgrösse der Sägespäne reichte von 0 mm bis 2,8 mm. Die Presszeit der Werkstoffmuster betrug 15 Minuten. Diese Muster werden im Folgenden als Standard-BNC-Verbundwerkstoff bezeichnet. Die Ergebnisse der Prüfungen der Standard-BNC-Verbundwerkstoffe wurden als Bezugspunkt verwendet, um die Veränderung der Querkzugfestigkeit und Biegesteifigkeit der Verbundwerkstoffe nach einem oder mehreren Recyclingprozessen zu ermitteln. Für das Recycling wurden die Verbundwerkstoffe für 16 Stunden in einen mit 60 mm Wasser gefüllten Kunststoffbehälter getaucht. Nach Ablauf dieser Zeit wurden die Prüfkörper aus dem Behälter genommen und manuell dispergiert. Danach wurde diese Dispersion unter den gleichen Bedingungen zum wiederholten Mal zu Werkstoffmustern gepresst. Es wurden jedoch unterschiedliche Anteile an Cellulose zugegeben (0 %, 2 %, 5 % und 8 %). Um mehrfache Recyclingschritte bewerten zu können, wurde der Prozess bis zum dreimaligen Recycling durchgeführt.

3.5 Bestimmung der mechanischen, physikalischen und mikrostrukturellen Eigenschaften

Zur Bestimmung der Abmessungen wurden aus den Werkstoffmustern Prüfkörper mit einer Grösse von 50 mm x 50 mm zugeschnitten, nachdem sie mindestens 24 Stunden bei einer Luftfeuchtigkeit von 65 % und einer Temperatur von 20 °C wurden. Anschliessend wurden alle Prüfkörper gemessen (Länge, Breite, Dicke und Gewicht). Daraus wurde die Dichte berechnet.

Die Auswertung der Dichteverteilung über die Plattendicke wurde mit dem Compact X-Ray Density Profile Analyzer DPX400-LTE durchgeführt. Dazu wurden die 50 mm x 50 mm grossen Prüfkörper in das Gerät eingelegt und das Dichteprofil bestimmt.

3.5.1 Querkzugfestigkeit

Die Querkzugfestigkeit ist die wichtigste Eigenschaft für die Bewertung der Bindungseigenschaften zwischen Partikeln in Verbundwerkstoffen. Um diese zu messen, wurden Zugversuche senkrecht zur Oberfläche nach der SN EN 319 (1993) durchgeführt. Diese Prüfungen wurden mit einer Zwick Roell testXpert 3 Maschine (Z030) mit einem Kraftaufnehmer mit 20 kN Kapazität durchgeführt. Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper mindestens 24 Stunden lang bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % und einer Temperatur von 20 °C konditioniert. Die vorgeschrittenen Prüfkörper mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm wurden mit Heisskleber auf Aluminiumprüfvorrichtungen befestigt. Die Prüfung wurde mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,5 mm/min durchgeführt. Die Querkzugfestigkeit wurde dann nach der folgenden Formel berechnet:

$$\text{Querkzugfestigkeit} = \frac{\text{Maximale Kraft}}{\text{Länge} \times \text{Breite}}$$

Nach dem Test wurde das Bruchbild bewertet und Prüfkörper mit unzureichender Adhäsion sowie ungültige Prüfkörper wurden zurückgewiesen.

3.5.2 Biegesteifigkeit

Zur Durchführung der Dreipunkt-Biegeversuche wurden aus jedem konditionierten Werkstoffmuster 50 mm x 230 mm grosse Prüfkörper herausgeschnitten. Die Prüfung wurde mit einer Spannweite von 150 mm und einer Belastungsgeschwindigkeit von 12 mm/min durchgeführt. Diese Dreipunkt-Biegeversuche wurden mit einer Zwick Roell testXpert 3 Maschine (Z030) mit einem Kraftaufnehmer mit 30 kN Kapazität durchgeführt.

3.5.3 Dickenquellung, Wasseraufnahme und Masseverlust

Dickenquellung und Wasseraufnahme wurden nach Suisse et al. (1993) gemessen. Vor dem Eintauchen in das Wasser wurden das Gewicht und die Abmessungen der Prüfkörper bestimmt. Die Prüfkörper wurden senkrecht in sauberem, stehendem Wasser bei einer Temperatur von 20 °C in einem Gitter gelagert, so dass sie sich nicht berühren konnten. Der Behälter wurde mit Wasser gefüllt, bis die Prüfkörper mit 25 mm Wasser bedeckt waren. Nach 24 Stunden wurden die Prüfkörper aus dem Wasser genommen. Das überschüssige Wasser wurde entfernt, indem die Prüfkörper 10 Minuten lang zum Entwässert abgelegt wurden. Die Dickenquellung und die Wasseraufnahme wurden nach den folgenden Formeln berechnet:

$$\text{Dickenquellung (\%)} = \frac{\text{Dicke (nach dem Einweichen)} - \text{Dicke (vor dem Einweichen)}}{\text{Dicke (vor dem Einweichen)}}$$

$$\text{Wasseraufnahme (\%)} = \frac{\text{Masse (nach dem Einweichen)} - \text{Masse (vor dem Einweichen)}}{\text{Masse (vor dem Einweichen)}}$$

Zur Bestimmung des Massenverlustes der Prüfkörper während der Wasserlagerung wurden vier Prüfkörper eines Standard-BNC-Verbundwerkstoffs auf eine Grösse von 50 mm x 50 mm zugeschnitten und das Gewicht im ofengetrockneten Zustand aufgenommen. Anschliessend wurden diese Prüfkörper 16 Stunden lang in Wasser getaucht, wo sie mit mindestens 25 mm Wasser bedeckt waren. Nach der Wasserlagerung wurden die Prüfkörper erneut im Ofen getrocknet und ihr Gewicht bestimmt. Anschliessend wurde der Massenverlust mit Hilfe der folgenden Formel berechnet:

$$\text{Massenverlust (\%)} = \frac{\text{Ausgangsgewicht} - \text{Endgewicht}}{\text{Ausgangsgewicht}} \times 100$$

Für die statistische Auswertung wurden alle Ergebnisse in Microsoft Excel analysiert. Wenn ein Mittelwert angegeben ist, handelt es sich um das arithmetische Mittel. Die Berechnung der Standardabweichung basierte auf der Annahme einer Stichprobe. Der Stichprobenumfang ist in den dargestellten Ergebnissen angegeben. Die Regressionsanalyse in Excel wurde verwendet, um die Korrelation zwischen zwei Parametern zu überprüfen (z. B., ob die Querkzugfestigkeit mit der Dichte korreliert).

3.5.4 Mikrostruktur von BNC-Verbundwerkstoffmustern

Für die Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurde das Hitachi-Tischmikroskop TM3030 verwendet. Zunächst wurden Prüfkörper nach der Prüfung der Querkzugfestigkeit durch Sputtern mit Gold-Palladium-Pulver an der Bruchstelle beschichtet. Anschliessend wurden sie mit doppelseitigem Klebeband auf Probenträgern befestigt, bevor sie zur Analyse in die Vakuumkammer gelegt wurden. Für die Analyse mit dem Digitalmikroskop Keyence VHX -7100 wurden getestete Prüfkörper verwendet, um die Kontaktflächen zwischen den Holzpartikeln und der BNC sichtbar zu machen. Eine Oberflächenbehandlung war nicht erforderlich. Darüber hinaus wurden unverpresste Prüfkörper mit unterschiedlichen Feuchtegehalten verglichen, um die Verteilung der BNC auf den Holzpartikeln zu analysieren. Die Sägespäne wurden lediglich mit verschiedenen Feststoffkonzentrationen der BNC-Suspension vermischt und bei Raumtemperatur getrocknet. Um die BNC besser sichtbar zu machen und den Kontrast zu erhöhen, wurden einige Späne eingefärbt.

3.6 Bewertung der Produktionskosten

Das Kostenmodell von Poppensieker (2010), das sich mit der Untersuchung von Produktionskosten für Holzwerkstoffe beschäftigt, diente als Grundlage und gleichzeitig als Referenz für eine sehr grobe Kostenabschätzung der Herstellungskosten für die BNC-Verbundwerkstoffe, da diese vergleichbar mit Spanplatten werden könnten. Die Kosten für Vertrieb, Marketing, etc. wurden nicht berücksichtigt. Im Rahmen der Kostenanalyse wurden die Herstellungskosten in verschiedene Kategorien, Subkategorien und Sub-Subkategorien unterteilt. Die Hauptkategorien waren Investitionskosten, Personalkosten, Wartungskosten, Materialkosten und Energiekosten.

Ausserdem wurde ein Faktor ermittelt, der angibt, wie stark sich die erwarteten zukünftigen Kosten der BNC-Verbundwerkstoffe von den Kosten einer Spanplatte unterscheiden. Ein Faktor > 1 bedeutet höhere

Kosten, während ein Faktor < 1 niedrigere Kosten bedeutet. Ein Faktor von 0,7 entspricht also 70 % der erwarteten Kosten im Vergleich zu Spanplatten. Ein Faktor von 1,5 bedeutet, dass die Herstellungskosten für diese Kategorie im Vergleich zu Spanplatten um 50 % steigen würden. Um sowohl die Ober- als auch die Untergrenze der Preisschätzungen bzw. schwankende Preise abzudecken, wurden eine pessimistische und eine optimistische Annahme getroffen. Es wurde angenommen, dass die Dichten (ca. $0,6 \text{ g/cm}^3$) und der Bindemittelgehalt (10 Gew.-%) für den BNC-Verbundwerkstoff gleich sind wie für die Spanplatte. Die Angaben zu den Faktoren beruhen auf eigenen begründeten Annahmen und Schätzungen sowie auf Literaturdaten und Herstellerangaben.

3.7 Bewertung der Umtweltauswirkungen

Zur Abschätzung des Treibhauspotenzials der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen wurde eine Cradle-to-Gate-Analyse auf der Grundlage des Produktionsprozesses von Spanplatten für den Innenbereich durchgeführt. Die funktionelle Einheit wurde als 1 m^3 BNC-Verbundwerkstoff mit einer Dichte von $0,6 \text{ g/cm}^3$ und einem BNC-Gehalt von 10 Gew.-% definiert. Als Grundlage für die Berechnung des Treibhauspotenzials (THP-fossil 100 Jahre) für den Produktionsprozess des BNC-Verbundwerkstoffs diente der Prozess „Particle board, for indoor use (RER)/ particle board production, for indoor use / Cut-off, U“ aus der Datenbank ecoinvent 3.8. Der Prozess wurde mit der Software SimaPro 9.4.04 modifiziert. Im Wesentlichen wurden die Rohstoffe auf „Saw dust, wet, measured as dry mass (CH)/ sawing, softwood / Cut-off, U“ geändert. Für die thermische Energieerzeugung wurde folgender Prozess integriert: „Heat, district or industrial, other than natural gas (CH)/ heat production, softwood chips from forest, at furnace 1000kW, state-of-the-art 2014 / Cut-off, U“.

Es wurde davon ausgegangen, dass der Trocknungsprozess für den BNC-Verbundwerkstoff aufgrund des höheren Feuchtegehalts der Pressmatte etwa 50 % mehr thermische Energie erfordert als bei Spanplatten. Der Wert von 1043 MJ wurde daher auf 1565 MJ geändert. Die mit der Herstellung von UF-Harz verbundenen Prozesse wurden herausgenommen. Stattdessen wurde das von Forte et al. (2021) berechnete THP für die industrielle Produktion von BNC verwendet. Für elektrische Energie wurde folgender Prozess angenommen: „Electricity, medium voltage (RER)/ market group for electricity, medium voltage / Cut-off, U“ und für zusätzliche thermische Energie: „Heat, district or industrial, natural gas (RER)/ market group for heat, district or industrial, natural gas / Cut-off, U“. Beide Prozesse sind unverändert und wurden sowohl für die Spanplattenproduktion als auch für die Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen angenommen. Alle Prozesse, die nicht mehr als 1 % zum THP der Spanplattenproduktion beitragen, wurden nicht verändert oder beschrieben. Das THP wurde auf der Grundlage dieser vereinfachten Annahmen für die künftige Produktion von BNC-Verbundwerkstoff geschätzt. Der massgeschneiderte Prozess für die BNC-Verbundproduktion wird als „BNC-Verbundwerkstoff-Literaturansatz“ bezeichnet.

Zusätzlich wurde die Berechnung von Forte et al. (2021) an den Produktionsprozess von BNC angepasst, wie er von Treeless angewendet wird: Nach den Berechnungen von Forte et al. (2021) beträgt das THP $16,1 \text{ kgCO}_2\text{eq./kg}$ Trockenmasse BNC. Allerdings wurde bei diesem Verfahren auch die Herstellung des Nährbodens berücksichtigt, der mit einem grossen Anteil zum THP beiträgt. Die Herstellung der Rohstoffe (44 %), die Nährbodenaufbereitung (6 %) und die Inokulumvermehrung (5 %) sind Teilprozesse zur Herstellung des Nährbodens. Da die Treeless AG Abfälle aus der Saftproduktion verwendet, wird davon ausgegangen, dass die mit dem Abfallprodukt verbundenen Emissionen auf der Grundlage eines wirtschaftlichen Allokationsansatzes vernachlässigbar sind. Folglich können die mit der Herstellung des Mediums verbundenen Emissionen, die etwa 55 % der Gesamtemissionen ausmachen, vernachlässigt werden.

Darüber hinaus wird der nachgelagerte Prozess, der 17 % der gesamten Treibhausemissionen ausmacht, in die folgenden Prozesse unterteilt:

1. Zerkleinerung von Cellulose
2. Waschen von Cellulose
3. Pasteurisierung
4. Abfüllung in Kunststoffbehälter
5. Verpackung zum Transport

Nach Forte et al. (2021) ist ein erheblicher Teil THG-Emissionen auf den Energieverbrauch zurückzuführen. Daher wurde angenommen, dass die Verteilung der THG-Emissionen dem Energieverbrauch ent-

spricht. Die Hälfte der THG-Emissionen (50 %) in der Kategorie „Nachgeschalteter Prozess“ wird der Zellstoffvermahlung zugeschrieben, während weitere 10 % auf den Pasteurisierungsprozess zurückzuführen sind, die beide nicht Teil des Produktionsprozesses der Treeless AG sind. Die restlichen Emissionen verteilen sich auf die Teilprozesse 2, 4 und 5. Daher werden weitere 10 % ($17 \% * (50 \% + 10 \%)$) des gesamten THP abgezogen. Insgesamt werden also nur 35 % des von Forte et al. (2021) berechneten THP berücksichtigt. Dieses Verfahren, angepasst an den Herstellungsprozess des BNC der Treeless AG, wird als „BNC-Composite Treeless-Ansatz“ bezeichnet.

3.8 Durchführung von branchenspezifischen Workshops

Um potenzielle Anwendungen für einen BNC-Verbundwerkstoff zu definieren, wurden Unternehmen aus den Branchen der Verpackungsindustrie und des Innenausbaus jeweils zu dreistündigen Workshops eingeladen. In diesen Workshops wurden die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen im Projekt präsentiert und beispielhafte Muster unterschiedlicher BNC-Verbundwerkstoffe ausgehändigt. Anschliessend wurde ein Brainwriting durchgeführt, bei dem die Teilnehmenden Ideen für potenzielle Anwendungen notierten. Diese Ideen wurden dann vorgestellt, gesammelt und gruppiert, wodurch es zu Schwerpunkten kam, welche anschliessend in der gesamten Gruppe auf ihre Machbarkeit und Potenzial in unterschiedlichen Märkten diskutiert wurden.

4 Ergebnisse

Mit dem Wissen aus vorherigen Studien anderer und vorgestellten Verfahren liessen sich BNC-Verbundwerkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen, die auf ihre mechanischen Eigenschaften überprüft und mikroskopisch analysiert wurden. Zudem wurden die Produktionskosten, sowie das Treibhauspotenzial berechnet und Workshops durchgeführt, um potenzielle Anwendungen zu erarbeiten und die Machbarkeit einiger dieser Anwendungen zu prüfen.



Abbildung 10: BNC-Verbundwerkstoff hergestellt mit dem Heisspressverfahren

4.1 Grösse, Verteilung und Ertrag der Sägespäne

Das Siebverfahren an Sägespänen ergab drei verschiedene Siebfraktionen, die als klein, mittel und gross bezeichnet wurden. Die Ausbeute der „kleinen“ Siebfraktion, die Partikel von <1 mm umfasst, betrug 42 %. Die Ausbeute der „mittleren“ Fraktion, die Partikel mit einer Maschengrösse von 1-2,8 mm umfasst, betrug 33 %. Die Ausbeute der „grossen“ Fraktion, die aus Partikeln mit einer Maschenweite von >2,8 mm besteht, betrug 25 % (Tabelle 3). Die Vorversuche ergaben erhebliche Unterschiede in den Querkzugfestigkeiten der Prüfkörper. Daher wurde die Partikelfraktion „gross“ ausgeschlossen und für die Untersuchungen wurden nur Partikel im Bereich von 0-2,8 mm verwendet. Dies führte zu einer Gesamtausnutzung von 75 % der Sägespäne.

Tabelle 3: Ertrag der drei verschiedenen Siebfraktionen nach dem Sieben

	Klein	Mittel	Gross
Partikelgrösse	0-1 mm	1-2,8 mm	> 2,8 mm
Ertrag	42 %	33 %	25 %

4.2 Prozessstabilität der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen

Um die Schwankungen bei der Herstellung der Prüfkörper zu bewerten, wurden drei Prüfkörper mit konstanten Herstellungsparametern hergestellt und anschliessend ihre Dichte und Querkzugfestigkeit geprüft. Die mittlere Dichte betrug 0,68 g/cm³, mit einer Standardabweichung von 6,8 %. Die mittlere Querkzugfestigkeit lag bei 0,74 N/mm², mit einer Standardabweichung von 5,8 %. Die statistische Analyse ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Prüfkörpern in Bezug auf die Dichte und der Querkzugfestigkeit.

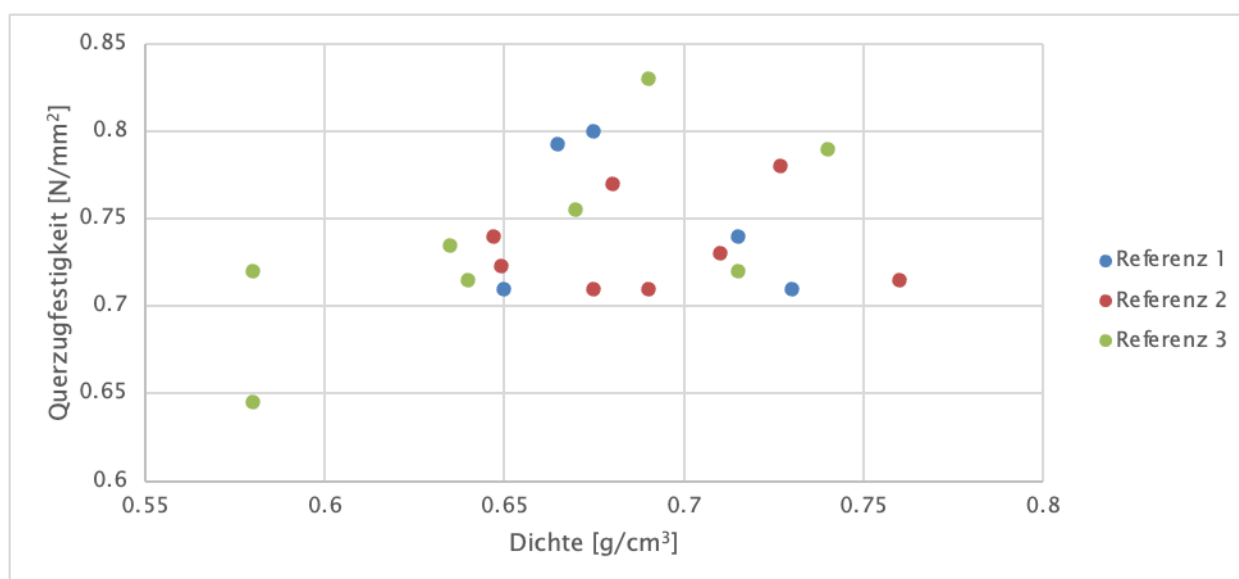


Diagramm 2: Vergleich der Dichte und Querkzugfestigkeit von drei Standard-BNC-Verbundwerkstoffen, die unter kontrollierten Variablen (gleiche Pressbedingungen) hergestellt wurden; n=7

4.3 Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Performance von BNC-Verbundwerkstoffen

4.3.1 Unterschiedlich gewaschene BNC

Zur Entfernung von Verunreinigungen wurde die BNC verschiedenen Waschverfahren unterzogen. Anschliessend wurde die unterschiedlich gewaschene BNC zur Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen unter konstanten Pressbedingungen verwendet und deren Querkzugfestigkeit geprüft. Alle Composite hatten Dichten zwischen 0,51 g/cm³ und 0,79 g/cm³. Die Ergebnisse zeigten einen Trend, bei dem eine Erhöhung der NaOH-Konzentration in der Waschlösung zu höheren Werten für die Querkzugfestigkeit der BNC-Verbundwerkstoffe führte. Bei einer NaOH-Konzentration von 6 % waren die Werte jedoch mit

0,54 N/mm² niedriger als bei einer Konzentration von 3 %, wo der Mittelwert für die Querkzugfestigkeit 0,69 N/mm² beträgt.

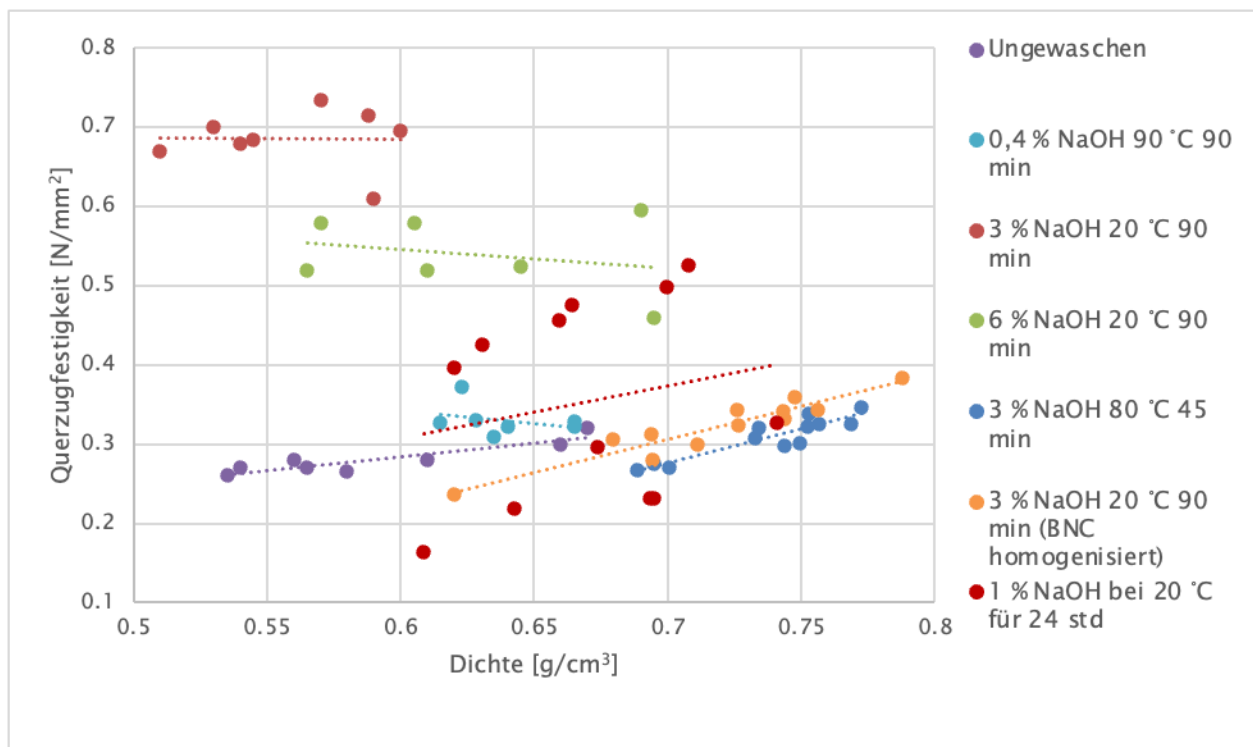


Diagramm 3: Einfluss von sechs verschiedenen Waschverfahren der als Bindemittel verwendeten BNC auf die Querkzugfestigkeit der Prüfkörper, hergestellt mit 10 Gew.-% BNC-Gehalt; n=5-12

Erhöhung der Temperatur und Reduzierung der Waschkdauer bei dem Waschanatz 5 „3 % NaOH 80 °C 45 min“ hat als Mittel 0,74 g/cm³ die höchste Dichte, allerdings die geringste Querkzugfestigkeit mit 0,31 N/mm². Das Homogenisieren der BNC vor dem Waschen zeigte, dass dies zu einer Verringerung der Querkzugfestigkeit führt. Der Mittelwert war hier 0,32 N/mm². Obwohl die anderen Parameter gleich wie bei dem Waschanatz 3 „3 % NaOH 20 °C 90 min“ waren, ist hier ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Zudem war zu beobachten, dass bei Waschanatz 7 „1 % NaOH 20°C 24 Std“ die Querkzugfestigkeit bei 0,35 N/mm² mit einer Standardabweichung von 35,3 % lag. Bei keinem der anderen Waschanätze war die Standardabweichung mit 5,4 und 12,1 % so stark.

Die gleichen Werkstoffmuster, die für die Prüfungen der Querkzugfestigkeiten verwendet wurden, wurden auch Biegeversuchen unterzogen. Die Werte für alle Verbundwerkstoffe lagen zwischen 2,76 und 6,21 N/mm². Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs, konnten hier keine statistisch signifikanten Schlussfolgerungen oder Trends ermittelt werden.

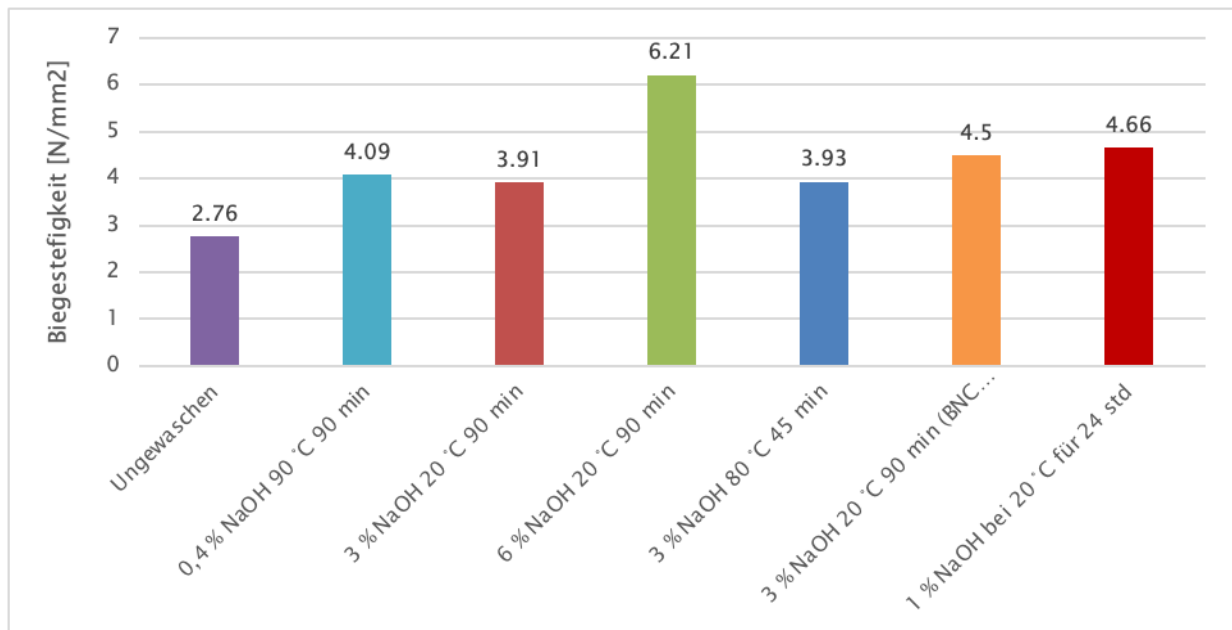


Diagramm 4: Biegesteifigkeit BNC-Verbundwerkstoffen bei Einsatz von BNC aus unterschiedlichen Waschprozessen; n=1

4.3.2 Verhältnis von BNC zu Sägespänen

Um den Einfluss des BNC-Gehalts auf die Querzugfestigkeit zu untersuchen, wurden Verbundwerkstoffe mit 10, 15 und 20 Gew.-% BNC unter Verwendung von zwei verschiedenen BNC-Chargen hergestellt, die sich durch das Waschverfahren der verwendeten BNC unterschieden (Waschansatz 3: 3 % NaOH 20 °C 90 min und Waschansatz 2: 0,4 % NaOH 95 °C 90 min). Die Dichte der Prüfkörper lag zwischen 0,59 g/cm³ und 0,74 g/cm³, und es wurden sechs Prüfkörper pro BNC-Gehalt gemessen. Der Vergleich der Querzugfestigkeit von Prüfkörpern mit 15 Gew.-% BNC und Prüfkörpern mit 20 Gew.-% BNC ergab keinen statistischen Unterschied, während die höchste Querzugfestigkeit bei 20 Gew.-% BNC und einer Dichte von 0,7 g/cm³ mit 1,04 N/mm² beobachtet wurde. Die Prüfkörper mit 10 Gew.-% BNC wiesen eine um 22 % geringere durchschnittliche Querzugfestigkeit als die Prüfkörper mit 15 Gew.-% und 20 Gew.-% BNC auf (Diagramm 5).

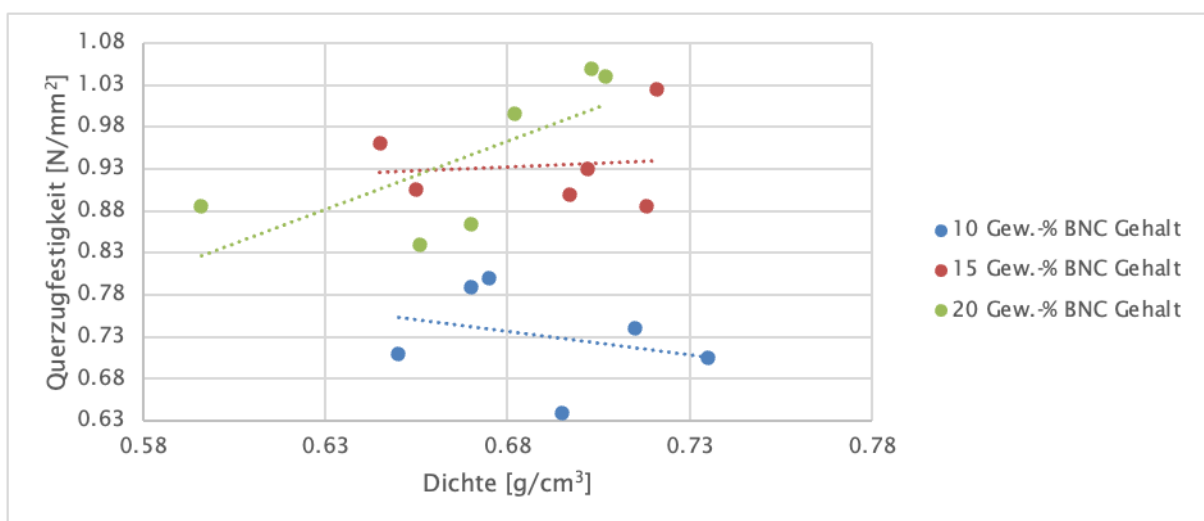


Diagramm 5: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 2 und 3), die für die Herstellung des Verbundwerkstoffs verwendet wurden, auf die Querzugfestigkeit der Prüfkörper; n=6

Für Prüfkörper, bei denen die BNC mit Waschansatz 1 gewaschen wurde, waren die Querzugfestigkeiten von BNC-Verbundwerkstoffen mit 15 Gew.-% und 20 Gew.-% BNC statistisch nicht voneinander zu unterscheiden. Die Dichte aller Prüfkörper lag zwischen 0,6 g/cm³ und 0,7 g/cm³, und für jeden BNC-Gehalt wurden 7 Prüfkörper gemessen. Die mittlere Querzugfestigkeit der mit 20 Gew.-% BNC hergestellten

Prüfkörper ist mit einem Wert von $0,64 \text{ N/mm}^2$ etwa 88 % höher als die der mit 10 Gew.-% BNC hergestellten Prüfkörper. Im Vergleich dazu ist die Querkzugfestigkeit von BNC-Verbundwerkstoffen, die mit 15 Gew.-% BNC hergestellt wurden, etwa 62 % höher als die von Verbundwerkstoffen mit 10 Gew.-% BNC und erreicht $0,55 \text{ N/mm}^2$. Dies deutet auf einen klaren Trend hin, dass die Querkzugfestigkeit mit steigendem BNC-Gehalt zunimmt. Bemerkenswert ist, dass der Unterschied in der Querkzugfestigkeit zwischen BNC-Verbundwerkstoffen mit 10 Gew.-% ($0,34 \text{ N/mm}^2$) und 15 Gew.-% BNC ($0,55 \text{ N/mm}^2$) grösser ist als der Unterschied zwischen BNC-Verbundwerkstoffen mit 15 Gew.-% und 20 Gew.-% BNC ($0,64 \text{ N/mm}^2$) (Diagramm 6).

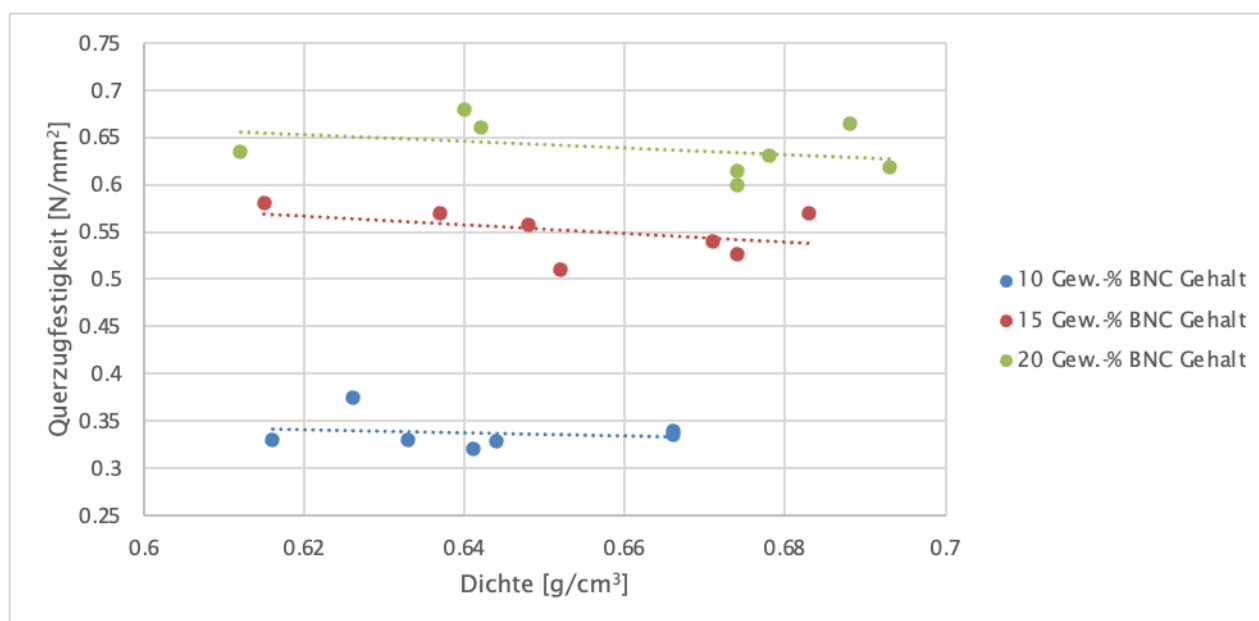


Diagramm 6: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 1), die für die Verbundwerkstoffherstellung verwendet wurden, auf die Querkzugfestigkeit der Prüfkörper; $n=7$

Die Dichteprofile aller Prüfkörper wiesen eine U-förmige Verteilung auf, was darauf hindeutet, dass die Dichten an der Oberfläche der Verbundwerkstoffe höher waren als die im Kern. Mit steigendem BNC-Gehalt nahm auch die Dichte an der Oberfläche der Prüfkörper zu, während die Kerndichten keinen Trend zeigten. Die Kerndichten des 10-Gew.-%-Prüfkörpers und des 20-Gew.-%-Prüfkörpers waren ähnlich, während die Kerndichte der 15-Gew.-%-Prüfkörper höher war.

Tabelle 4: Oberflächen- und Kerndichte von BNC-Verbundwerkstoffen, die mit Waschverfahren 3 gewaschen wurden

	10 Gew.-%	15 Gew.-%	20 Gew.-%
Oberflächendichte g/cm^3	0,60	0,86	0,87
Kerndichte g/cm^3	0,57	0,67	0,59

Mit steigendem BNC-Gehalt nahm auch die Biegefestigkeit zu. Diese Tendenz wurde sowohl bei den nach dem Waschverfahren 2 als auch nach dem Waschverfahren 3 hergestellten Prüfkörpern beobachtet. Da nur eine Prüfung durchgeführt wurde, können keine statistischen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Unterschiede in der Biegefestigkeit zwischen den beiden Waschverfahren und dem BNC-Gehalt gezogen werden. Es ist jedoch ein klarer Trend in Bezug auf den BNC-Gehalt erkennbar. Die Komposite mit 2 Gew.-% BNC-Gehalt erreichten $12,5 \text{ N/mm}^2$ und 8 N/mm^2 , während die Komposite mit 15 Gew.-% BNC-Gehalt ca. 7 N/mm^2 und die Komposite mit 10 Gew.-% BNC-Gehalt 4 N/mm^2 erreichten (Diagramm 7).

Der einzige Prüfkörper, die den Standardwert für die Biegesteifigkeit von P1 Spanplatten nach der SN EN 312:2010 (2010) erfüllte, war der Prüfkörper, der mit 20 Gew.-% BNC nach dem Waschverfahren 3 hergestellt wurde. Dieser erreichte auch die höchsten Werte bei der Querkzugfestigkeit und war damit der BNC-Verbundwerkstoff mit den insgesamt besten mechanischen Eigenschaften.

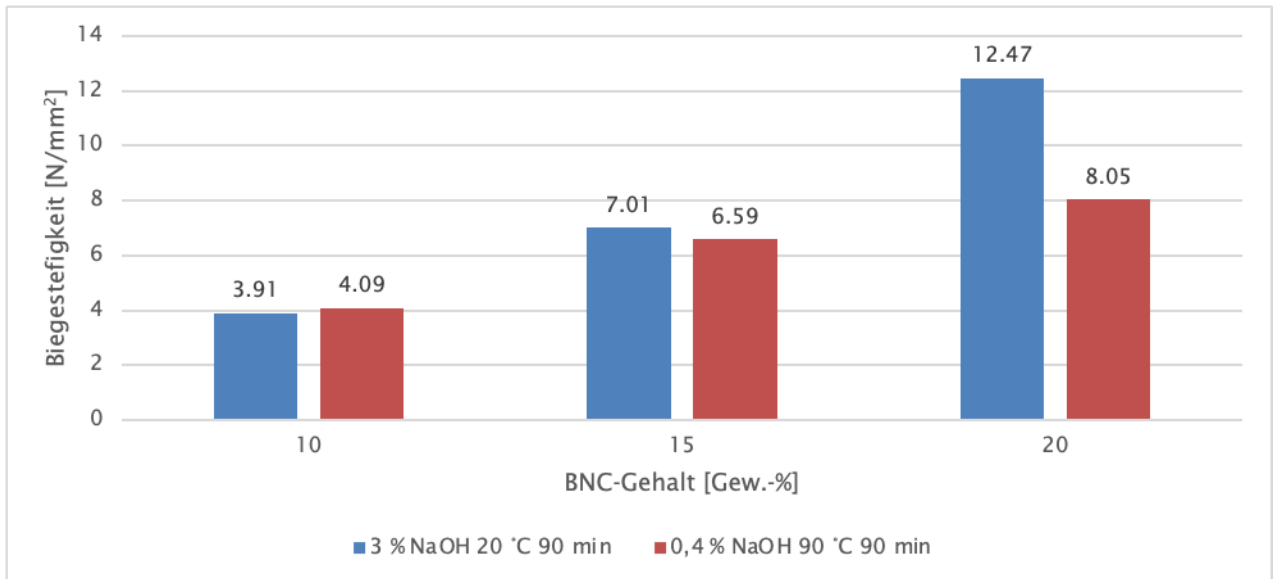


Diagramm 7: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 2 (0,4 % NaOH 90 °C 90 min) und 3 (3 % NaOH 20 °C 90 min)) auf die Biegefestigkeit der Prüfkörper; n=1

4.3.3 Dichtevariation der BNC-Verbundwerkstoffe

Um den Einfluss der Dichte auf Querkzugfestigkeit der Verbundwerkstoffe zu untersuchen, wurden Werkstoffmuster mit Zieldichten von etwa $0,4 \text{ g/cm}^3$ bis $0,7 \text{ g/cm}^3$ hergestellt, wobei die Herstellungsparameter konstant blieben. Mit zunehmender Dichte nahm auch die Querkzugfestigkeit der BNC-Verbundwerkstoffe zu. Geht man von einer linearen Beziehung zwischen Dichte und Querkzugfestigkeit aus, zeigt die positive Steigung (0,75) eine positive Korrelation zwischen diesen Variablen. Konkret bedeutet dies, dass die Festigkeit der Querkzugfestigkeit mit jeder Erhöhung der Dichte um 1 g/cm^3 um $0,75 \text{ N/mm}^2$ ansteigt. Das Bestimmtheitsmass (R^2) für diese lineare Anpassung beträgt 0,64. Nimmt man eine logarithmische Beziehung an, beträgt R^2 0,68, was auf eine etwas bessere Beschreibung der Werte hindeutet. In diesem Fall nimmt die Querkzugfestigkeit bei niedrigeren Dichten schneller zu als bei höheren Dichten, was zu einer Kurve führt, die allmählich abflacht. Die Werte wurden in drei Dichtekategorien eingeteilt, und die durchschnittlichen Werte für die Querkzugfestigkeit waren wie folgt: bei einer durchschnittlichen Dichte von $0,45 \text{ g/cm}^3$ betragen diese Werte im Durchschnitt etwa $0,52 \text{ N/mm}^2$; bei einer durchschnittlichen Dichte von $0,56 \text{ g/cm}^3$ betragen diese Werte im Durchschnitt etwa $0,68 \text{ N/mm}^2$; und bei einer durchschnittlichen Dichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$ betragen diese Werte im Durchschnitt etwa $0,73 \text{ N/mm}^2$.

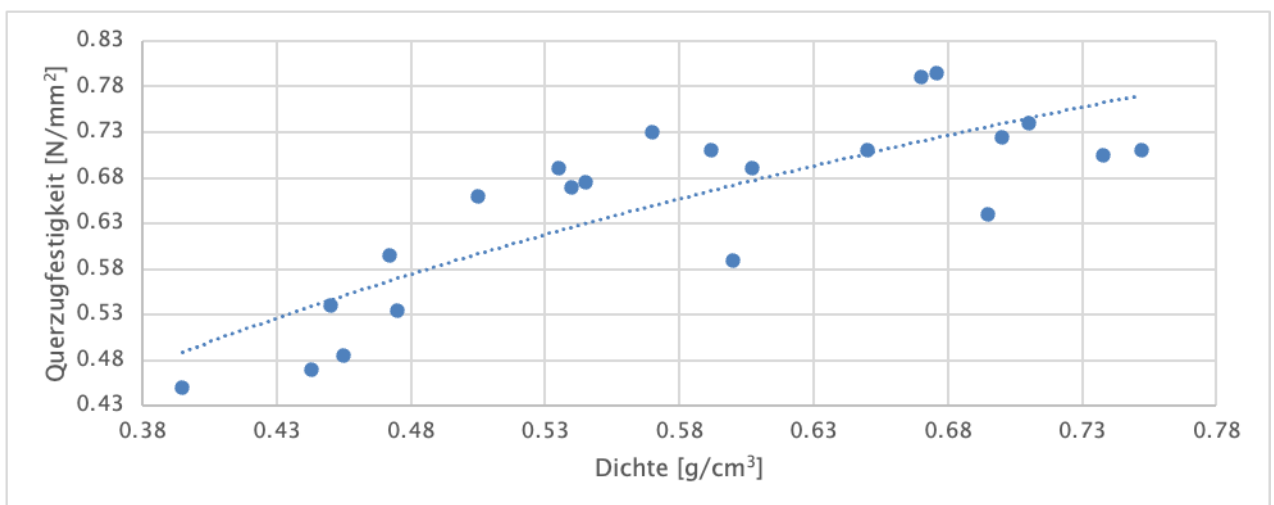


Diagramm 8: Einfluss verschiedener Dichten der Verbundwerkstoffe auf die Querkzugfestigkeit der Prüfkörper, dargestellt als leicht logarithmische Kurve; n=22

Die Biegeversuche an Prüfkörpern desselben Verbundwerkstoffs ergaben, dass der Verbundwerkstoff mit der höchsten Dichte einen Wert von 7,37 N/mm² erreichte, was etwa 82 % über den Werten der Verbundwerkstoffe mit mittlerer und niedriger Dichte lag. Die Biegefestigkeit des Verbundwerkstoffs mit mittlerer und niedriger Dichte wies keine erkennbaren Unterschiede auf, beide erreichten einen Wert von 3,91 N/mm².

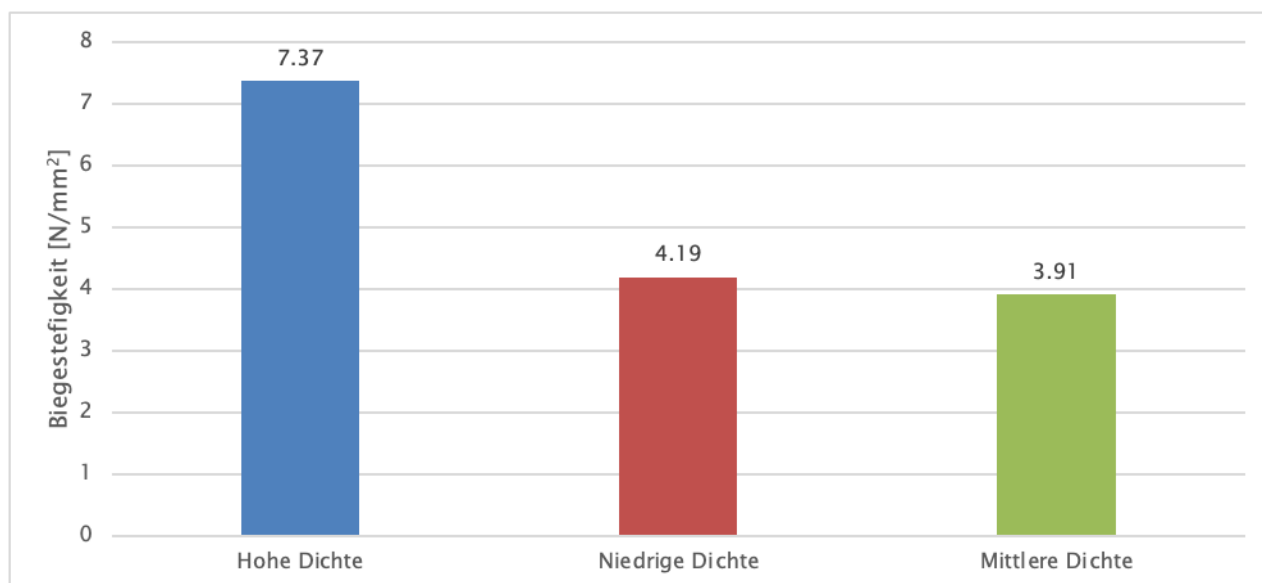


Diagramm 9: Einfluss verschiedener Dichten des Verbundwerkstoffs auf die Biegefestigkeit; n=1

4.3.4 Holzpartikelgrösse

Um den Einfluss unterschiedlicher Partikelgrößen aus den Sägenebenprodukten auf die Querkzugfestigkeit zu bewerten, wurden zwei Werkstoffmuster mit Partikeln der Siebfractionen 0-1 mm und 1-2,8 mm hergestellt und geprüft. Die mittleren Querkzugfestigkeiten der mit kleineren Partikeln (0-1 mm) hergestellten Prüfkörper waren 10 % höher als die der mit grösseren Partikeln (1-2,8 mm) hergestellten Prüfkörper. Die Standardabweichungen der Dichten für beide Prüfkörper betragen 3,6 %, während die Standardabweichungen der Querkzugfestigkeiten bei den Prüfkörpern mit kleineren Partikeln 2,8 % und mit grösseren Partikeln 5,9 % betragen. Insgesamt waren die Unterschiede in der Querkzugfestigkeit von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Partikelgrößen mit einer Abweichung von 10 % von den Mittelwerten nicht besonders gross, wenn man die Standardabweichungen berücksichtigt. Es war jedoch ein deutlicher Trend zu höherer Querkzugfestigkeit mit abnehmender Partikelgröße zu erkennen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Querkzugfestigkeiten zeigten die Werte für die Biegeversuche einen abweichenden Trend. Die Werte für die Prüfkörper, die mit den kleinen Partikeln der Siebfraction (0-1 mm) hergestellt wurden, wiesen im Vergleich Prüfkörper mit zu den grossen Partikeln (6 N/mm²) eine Verringerung um 43 % auf. Die Dichteprofile beider Werkstoffmuster wiesen keine ausgeprägte U-Form auf, was darauf hindeutet, dass die Dichten zwischen der Oberfläche und dem Kern relativ ähnlich waren.

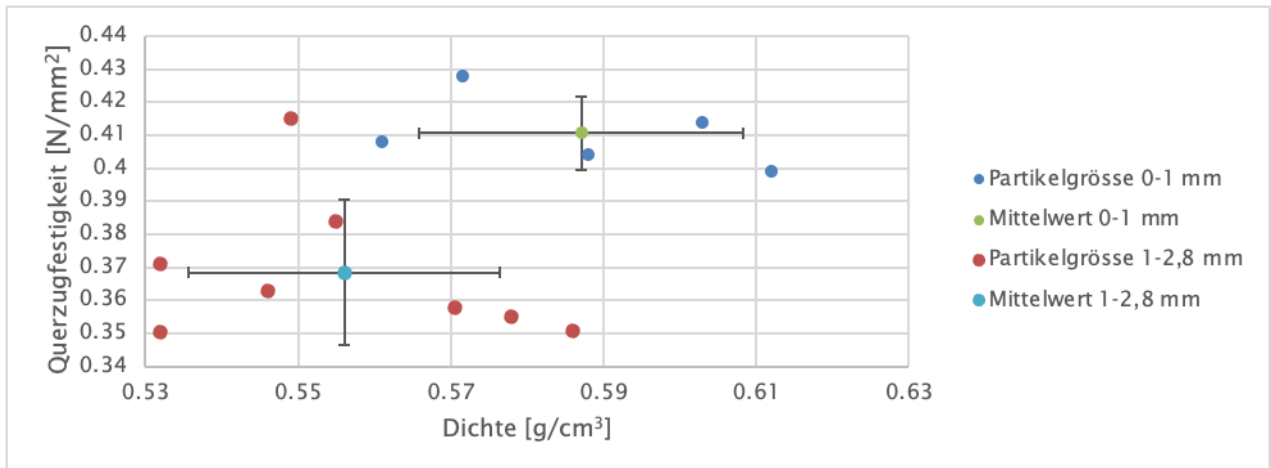


Diagramm 10: Einfluss der Partikelgröße in dem Verbundwerkstoff auf die Querzugfestigkeit; n=5-8



Abbildung 11: Prüfkörper mit den Partikelgrößen 0-1 mm (oben) und 1-2,8 mm (unten)

4.3.5 Feuchtegehalt der Pressmatte

Die Pressmatte, wiess im Standard-BNC-Verbundwerkstoff eine anfängliche Mattenfeuchte von etwa 650 % auf. Die Anwendung von mechanischem Druck während des Pressvorgangs (5 Minuten Vorpressen bei 150 bar und 10 Minuten Hauptpressen bei 210 bar) führt zu einer Verringerung des Feuchtegehalts der Matte von 650 % auf etwa 200 %. Infolgedessen wird der Wassergehalt des Verbundwerkstoffs um 72 % reduziert, was zu einem Verlust von 306 ml Wasser führt. Die verbleibenden 28 % des Wassers (119 ml), die für eine weitere Verringerung des Feuchtegehalts der Matte von etwa 200 % auf 5 % - 10 % erforderlich sind, werden durch die von den beheizten Platten der Presse (150 °C) zugeführte Wärme verdampft.

Um den Einfluss des Feuchtegehalts der Pressmatte und damit die Verteilung von BNC auf den Holzpartikeln zu analysieren, wurden vier verschiedene Werkstoffmuster mit unterschiedlichen Feuchtegehalten der Pressmatte hergestellt und ihre Querkzugfestigkeit verglichen. Die Dichten der hergestellten Prüfkörper lagen bis auf wenige Ausnahmen in einem Bereich von $0,63 \text{ g/cm}^3$ bis $0,73 \text{ g/cm}^3$.

Es wurde festgestellt, dass der Feuchtegehalt der Pressmatte einen statistisch hoch signifikanten Einfluss hat. Die mit Pressmattenfeuchten zwischen 400 % und 200 % hergestellten Prüfkörper wiesen weder bei der Dichte noch bei der Querkzugfestigkeit signifikante Unterschiede auf. Die Querkzugfestigkeiten der mit einer Pressmattenfeuchte von 150 % hergestellten Prüfkörper unterschieden sich signifikant von denen der anderen Prüfkörper. Die durchschnittlichen Querkzugfestigkeiten dieser sanken um 40 %, obwohl die Dichte konstant blieb. Es konnte beobachtet werden, dass bei einem Feuchtegehalt der Pressmatte von 150 % bis 200 % die Querkzugfestigkeit der hergestellten Prüfkörper abnahm.

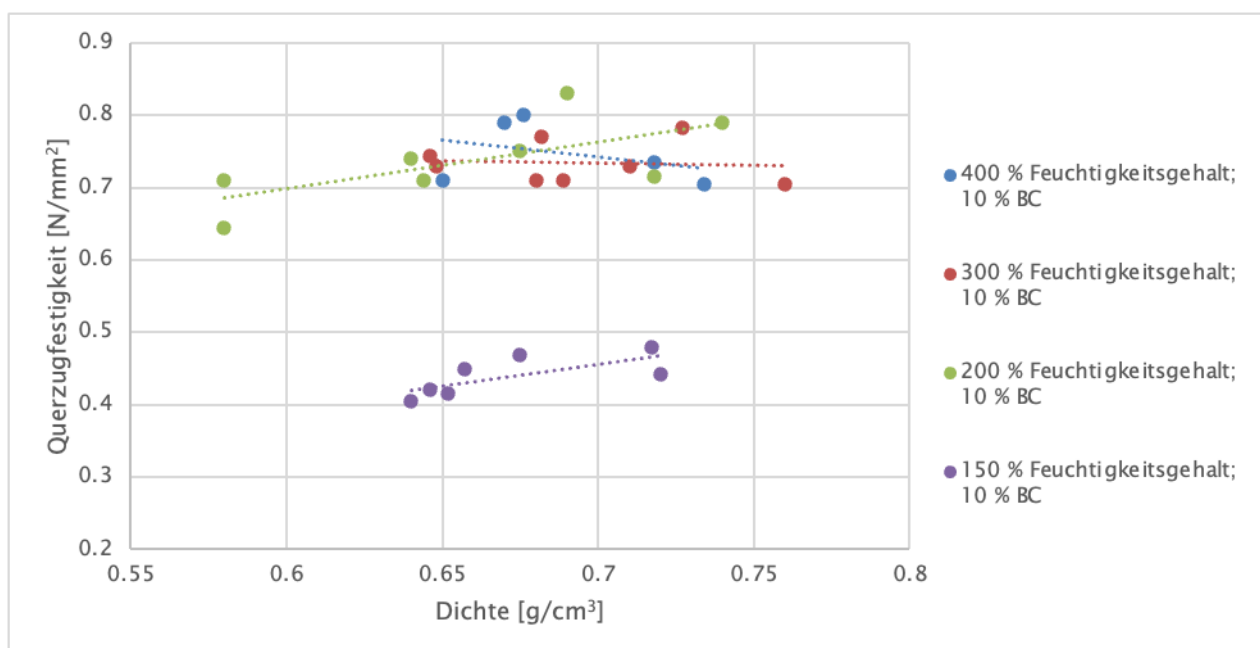


Diagramm 11: Einfluss des Feuchtegehalt der Pressmatte auf die Querkzugfestigkeit der Verbundwerkstoffe; n=5-8

Bei den Biegeversuchen an denselben Werkstoffmustern konnte kein eindeutiger Trend festgestellt werden, da die Anzahl der Prüfkörper begrenzt war und somit keine statistisch gültige Aussage möglich war. Die Werte der Prüfkörper mit einer Pressmattenfeuchte von 400 % bis 150 % wiesen eine beträchtliche Variabilität auf und reichten von $3,6 \text{ N/mm}^2$ bis $7,4 \text{ N/mm}^2$. Der Prüfkörper mit dem höchsten Feuchtegehalt wies den höchsten Wert auf, der mehr als doppelt so hoch war wie der des Prüfkörpers mit dem niedrigsten Feuchtegehalt.

Die Dichteprofile aller vier Prüfkörper wiesen ein U-förmiges Muster auf. Alle Prüfkörper, mit Ausnahme von dem mit 200 % Feuchtegehalt, wiesen eine Oberflächendichte von etwa $0,84 \text{ g/cm}^3$ und eine Kerndichte von etwa $0,73 \text{ g/cm}^3$ auf. Bei dem Verbundwerkstoff mit 200 % Feuchtegehalt lag die Kerndichte bei $0,61 \text{ g/cm}^3$ und die Oberflächendichte bei $0,69 \text{ g/cm}^3$.

4.3.6 Dicke, Dichte und Spangröße

Zusätzlich zu den Werkstoffmustern, die für alle Versuche hergestellt wurden, um verschiedene Parameter hinsichtlich der Querkzugfestigkeiten und der Biegeeigenschaften zu analysieren, wurde versucht, einen BNC-Verbundwerkstoff hoher Dichte mit geringer Dicke und einen BNC-Verbundwerkstoff niedriger Dichte mit höherer Dicke herzustellen. Bei der Herstellung dieser „Extremvarianten“ erwiesen sich der Pressdruck und das Werkzeug als limitierende Faktoren, weshalb bei der hochdichten Variante keine höhere Dichte als $0,71 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden konnte. Für die Werkstoffmuster niedriger Dichte konnte eine Dicke von mehr als 10 mm nicht erreicht werden, da die Pressmatte sonst höher gewesen wäre als die Aluminiumpressform. Ausserdem wurde festgestellt, dass die Presszeit bei der Variante mit niedriger Dichte erheblich verlängert werden musste, um eine vollständige Trocknung des Werkstoffmusters

zu gewährleisten. Dies lag zum einen an der höheren Dicke, die zu einer verbesserten Isolierwirkung führte, und zum anderen daran, dass aufgrund der geringeren Dichte ($0,25 \text{ g/cm}^3$ und $0,45 \text{ g/cm}^3$) weniger Wasser mechanisch ausgepresst werden konnte.

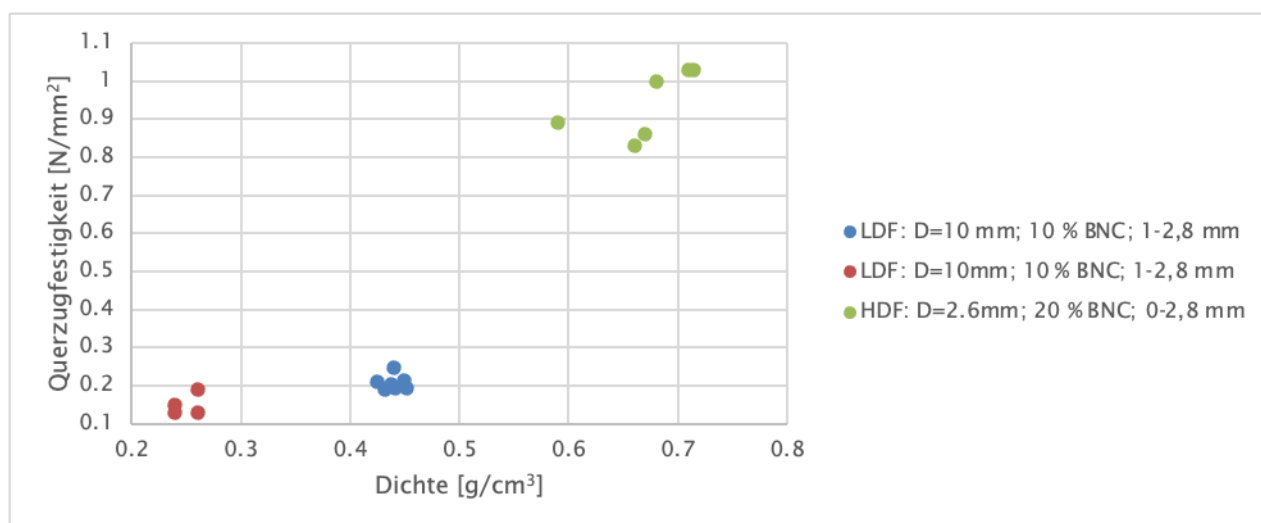


Diagramm 12: Querzugfestigkeit von verschiedenen BNC-Verbundwerkstoffen, mit unterschiedlichen Dicken und Dichten; n=4-7

Die Prüfkörper mit niedriger Dichte von $0,25 \text{ g/cm}^3$ erreichten durchschnittliche Querzugfestigkeiten von $0,15 \text{ N/mm}^2$, während die Prüfkörper mit einer Dichte von $0,45 \text{ g/cm}^3$ durchschnittliche Werte von $0,21 \text{ N/mm}^2$ erreichten. Ausserdem wurde eine geringere Streuung der Werte im Vergleich zum Werkstoffmuster mit hoher Dichte beobachtet. Die hochdichten Prüfkörper ($0,67 \text{ g/cm}^3$) wiesen durchschnittliche Querzugfestigkeiten von $0,94 \text{ N/mm}^2$ auf.

4.4 Dickenquellung und Wasseraufnahme

BNC-Verbundwerkstoffe mit unterschiedlichen Produktions- und Materialparametern wurden hinsichtlich ihrer Wasserstabilität verglichen. Daher wurden die Dickenquellung und die Wasseraufnahme dieser Verbundwerkstoffe untersucht. Zunächst wurden die mit unterschiedlich gewaschener BNC hergestellten Prüfkörper hinsichtlich ihrer Dickenquellung verglichen. Es zeigte sich ein klarer Trend: Mit zunehmender NaOH-Konzentration während des Waschvorgangs, d.h. mit intensiverem Waschen oder Behandeln mit NaOH, nahm die Dickenquellung der Prüfkörper ab. Der Prüfkörper mit ungewaschener BNC als Bindemittel quoll um 105 %, während der mit 6 % NaOH gewaschene Prüfkörper nur um 63 % quoll. Die statistische Analyse ergab, dass die Dichte der Verbundwerkstoffe mit unterschiedlich gewaschener BNC keinen signifikanten Einfluss auf das Quellverhalten hatte.

Die mit unterschiedlichen BNC-Gehalten hergestellten Prüfkörper quollen in einem Bereich von 63 % bis 77 % auf, wobei zwischen 15 % und 20 % Cellulosegehalt kein signifikanter Unterschied festgestellt wurde. Nur der mit 10 % Cellulose hergestellte Prüfkörper quoll um 20 % stärker auf.

Sowohl die kleinere Partikelgrösse als auch die geringere Dichte führten zu einer geringeren Quellung der Prüfkörper, wobei beide Varianten um etwa 50 % quollen. Entsprechend dem Trend bei der Dickenquellung verhielt sich die Wasseraufnahme bzw. Gewichtszunahme der Prüfkörper ähnlich. Prüfkörper mit höheren Dickenänderungen nahmen mehr Wasser auf.

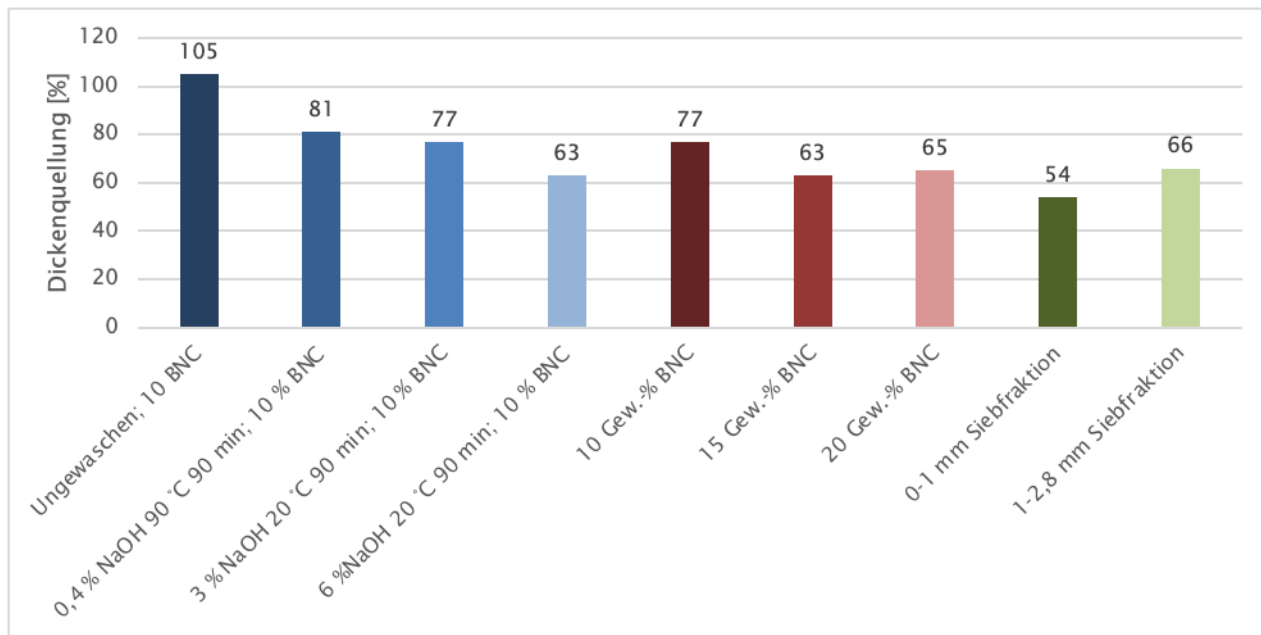


Diagramm 13: Dickenquellung von BNC-Verbundwerkstoffen hergestellt mit unterschiedlichen Produktions- und Materialparametern; n=4

4.5 Rezyklierbarkeit und Performance von unterschiedlichen recycelten BNC-Verbundwerkstoffen

Um den Einfluss vom Recycling auf die Querkzugfestigkeiten der BNC-Verbundwerkstoffe zu testen und die erforderliche BNC-Menge zur Wiederherstellung der ursprünglichen Querkzugfestigkeit zu bestimmen, wurden fünf unterschiedlich rezyklierte Verbundwerkstoffe mit einem Referenzverbundwerkstoff hinsichtlich ihrer Querkzugfestigkeit verglichen. Die Prüfkörper des Referenzverbundwerkstoffs, die sehr geringe Standardabweichungen in Bezug auf Dichte (2 %) und Querkzugfestigkeit (5 %) aufwies, zeigten eine durchschnittliche Querkzugfestigkeit von 0,55 N/mm² bei einer Dichte von 0,62 g/cm³.

Die Prüfkörper, die ohne den Zusatz von BNC während des Recyclingprozesses rezykliert wurden, wiesen im Vergleich zu dem Referenzverbundwerkstoff eine geringere Querkzugfestigkeit und geringere Dichten auf. Prüfkörper, die einen Recyclingprozess ohne den Zusatz von BNC durchlief, erreichten eine durchschnittliche Querkzugfestigkeit von 0,36 N/mm². Auch die Dichte variierte mit einem Mittelwert von 0,49 g/cm³.

Die Dichte der Prüfkörper, die zwei Recyclingprozesse durchlief, lag mit einem Mittelwert von 0,60 g/cm³ nahe an der Referenz (0,62 g/cm³), wobei die Querkzugfestigkeiten im Durchschnitt um ca. 27 % niedriger waren (0,40 N/mm²) (Diagramm 14). Beim zweiten Recyclingprozess wurde beobachtet, dass der Verbundwerkstoff bereits im Wasser seine Struktur verloren hatte und sich einzelne Partikel ablösten. Dies war beim ersten Recyclingprozess nicht der Fall, bei dem sich keine Partikel ablösten und die Struktur des Verbundwerkstoffs intakt blieb.

bar. Mit dem dritten Mal Recyceln hat sich die Querkzugfestigkeit jedoch auf einem Niveau stabilisiert. Mit der Zugabe von 2 % BNC war es möglich den Verlust an Querkzugfestigkeit zu verringern, aber nicht komplett zu verhindern. Beim ersten Recyclingzyklus ist der Wert von 0,47 N/mm² auf 0,42 N/mm² gefallen. Dieser Trend von weniger als 12 % Verlust hat sich auch in den folgenden Recyclingzyklen widerspiegelt (Diagramm 15).

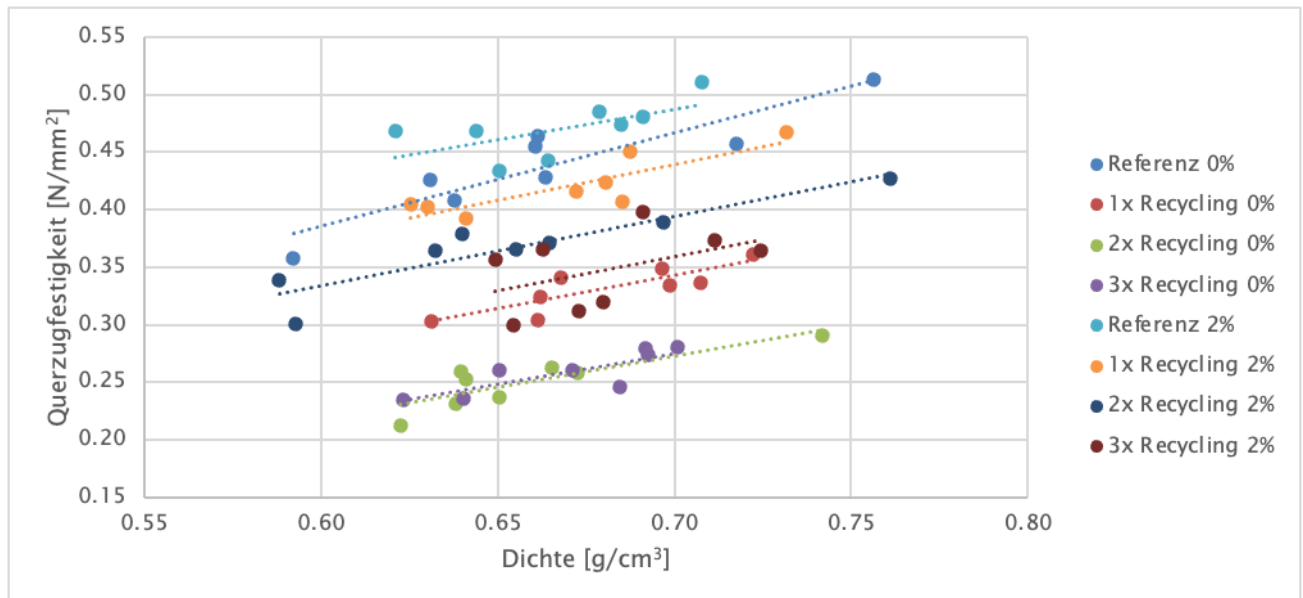


Diagramm 15: Querkzugfestigkeiten von mehrfach recycelten BNC-Verbundwerkstoffen; n=8

Die Biegeversuche, die mit den identischen Werkstoffmustern durchgeführt wurden, zeigten einen vergleichbaren Trend in Bezug auf die Festigkeit. Da jedoch jeweils nur ein Versuch durchgeführt wurde, sind die Ergebnisse nicht endgültig. Der Referenzverbundwerkstoff, der keinem Recyclingprozess unterzogen wurde, erreichte den höchsten Wert von 5,2 N/mm². Die Komposite, denen BNC in unterschiedlichen Mengen zugesetzt wurde, wiesen Werte zwischen 3,3 N/mm² und 4,7 N/mm² auf. Der niedrigste Wert wurde bei dem Verbundwerkstoff beobachtet, der zwei Recyclingprozesse durchlief, mit einem Wert von 1,7 N/mm² (Diagramm 16).

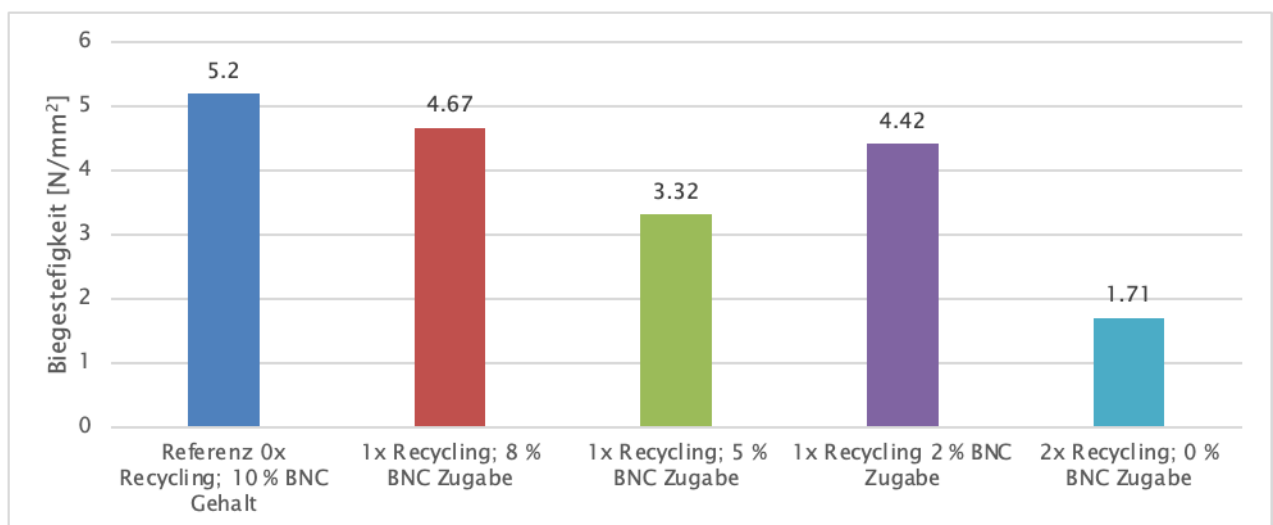


Diagramm 16: Biegesteifigkeit von recycelten Verbundwerkstoffen mit unterschiedlichen Zugaben von BNC; n=1

Um diese Erkenntnis zu validieren, wurden Folgeversuche mit mehr Stichproben (n=4) durchgeführt. Es ist dabei zu erkennen, dass vor allem nach dem ersten Recyclingzyklus die Biegesteifigkeit abgenommen hat. Bei den Prüfkörpern des Verbundwerkstoffs ohne Zugabe von zusätzlicher BNC betrug dieser Verlust 44 %. Mit der Zugabe von 2 % BNC konnte dieser Abfall halbiert (21 %) werden. Bei allen weiteren

Recyclingzyklen haben sich die Biegesteifigkeiten stabilisiert und es ist kein Trend von weiterem Verlust der Biegefestigkeit zu erkennen.

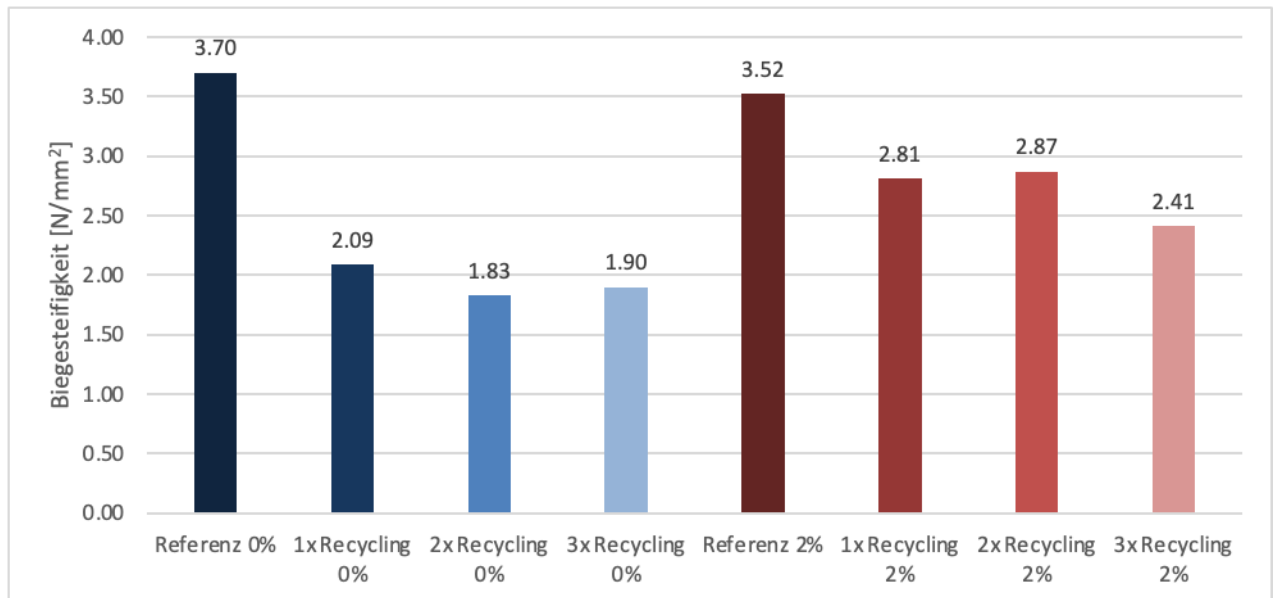


Diagramm 17: Biegesteifigkeiten von mehrfach recycelten BNC-Verbundwerkstoffen; n=4

4.6 Mikroskopische Bilder der mit BNC gebundenen Sägespäne

Die Visualisierung der Verbindung zwischen Holzpartikeln und BNC wurde mit Hilfe eines Lichtmikroskops und eines Rasterelektronenmikroskops durchgeführt. Die mit dem Lichtmikroskop erstellten Bilder Abb. 7 und 8 zeigen, dass die BNC grosse Teile der Holzpartikel bedeckt und dass sich die Cellulose an der Grenzfläche zwischen mehreren Holzpartikeln absetzt und die Hohlräume zwischen den Partikeln ausfüllt. Die BNC bildet sowohl bei den unverdichteten Partikeln (Abb. 7) als auch bei den verdichteten Partikeln (Abb. 8) eine Art Brücke zwischen den Partikeln und hält sie so zusammen.

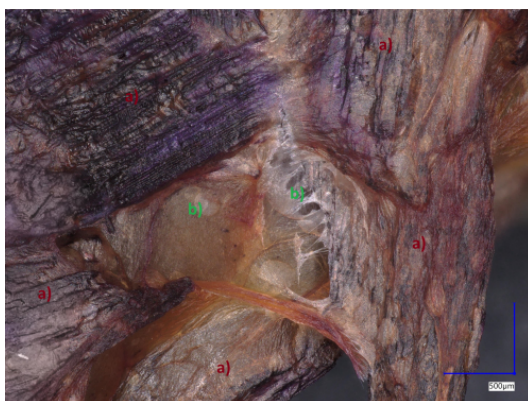


Abbildung 13: Lichtmikroskopbild; unverpresste gefärbte Holzpartikel a), die fast vollständig mit einer dünnen BNC-Schicht bedeckt sind, und eine brückenartige BNC-Struktur, die zwischen den Holzpartikeln b) gebildet wird

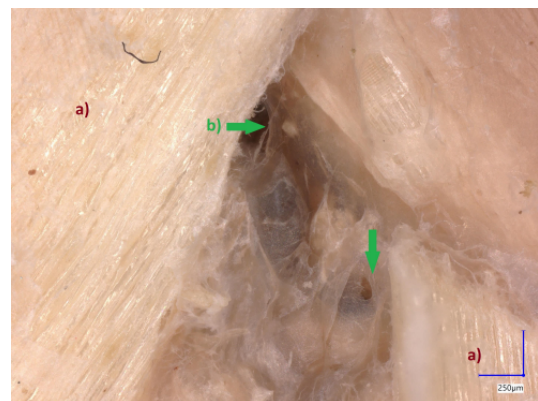


Abbildung 14: Lichtmikroskopbild; komprimierte Holzpartikel a), die fast vollständig mit BNC b) benetzt sind; Blick in die Hohlräume einer Stirnseite eines BNC-Verbundwerkstoffs mit 10 Gew.-% BNC-Gehalt

Ausserdem konnte die Struktur der BNC und ihre Bindung an Holzpartikel mit dem REM beobachtet werden (Abb. 9). Die BNC bildete zum grössten Teil Agglomerate, die an die Holzpartikel gebunden sind. Ausserdem waren einzelne dünne Fasern zu erkennen.

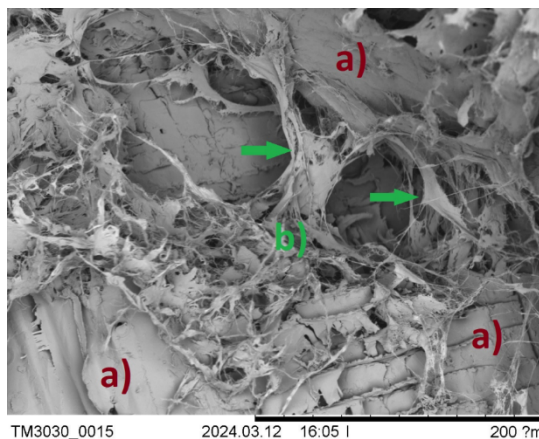


Abbildung 15: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Holzpartikeln a) beschichtet mit BNC b) und Brückenbildung und Agglomeration von BNC zwischen den Partikeln

Die Beobachtungen zeigten, dass die BNC teilweise in die Poren der Holzstruktur eindringt oder sich in den offenen Poren absetzt (Abb. 10).

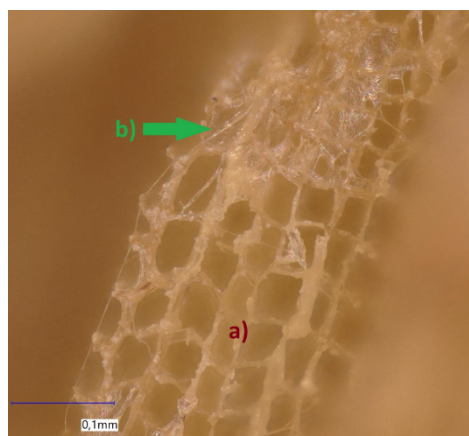


Abbildung 16: Lichtmikroskopbild: BNC-Partikel a) lagern sich in der offenen Holzporenstruktur b) ab

4.7 Kostenvergleich der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen und Spanplatten

In Anlehnung an die Untersuchung von Poppensieker (2010) wurden die Kosten einer Spanplatte mit den Kosten eines BNC-Verbundwerkstoffs verglichen. Die Analyse der Rohstoffkosten für die Spanplatte ergab, dass diese fast zwei Drittel der gesamten Herstellungskosten ausmachen. Die Kosten für das Holz machen 44 % der Gesamtkosten aus, während das Bindemittel 17 % der Gesamtkosten ausmacht. Die Energiekosten stellen mit einem Anteil von 16 % den zweitgrössten Kostenblock dar. Dabei sind die Kosten für elektrische Energie (9 %) relevanter als die für thermische Energie (7 %), da diese kostengünstig aus der Verbrennung von Nebenprodukten gewonnen werden kann. Investitionskosten und Abzahlungen machen insgesamt 13 % aus. Der geringste Anteil entfällt auf Personalkosten (6 %) und Instandhaltungskosten (4 %) (Poppensieker 2010). Eine vergleichende Analyse der Rohmaterialkosten pro Kubikmeter für Spanplatten und BNC-Verbundwerkstoffe zeigt, dass letztere nur 70 % des Preises der ersteren betragen. Die Rohmaterialien für Spanplatten werden aus einer Mischung verschiedener Sortimente gewonnen, während für BNC-Verbundwerkstoffe Sägespäne verwendet werden, die als Nebenprodukt in Sägewerken anfallen. Diese Sägespäne ist pro Kubikmeter etwa 70 % günstiger, was den Kostensenkungsfaktor von 0,7 erklärt, der sowohl in pessimistischen als auch in optimistischen Finanzprognosen verwendet wurde. (Poppensieker 2010).

Der Preis des Bindemittels, bei dem es sich im Fall von BNC-Verbundwerkstoffen um bakterielle Nanocellulose handelt, liegt zwischen dem 3- und 10-fachen des Preises von UF-Harz, das in der Spanplatte verwendet wird. Der Preis von UF-Harz liegt bei 0,31 CHF/kg, während der Preis von BNC laut der Treeless AG zwischen 1 CHF und 3 CHF liegt. Dies erklärt den Faktor von 9,7 bzw. 3,2 (Nr. 13) in Tabelle 5 sowohl in der pessimistischen als auch in der optimistischen Berechnung. Je nach gewähltem Berech-

nungsansatz liegt der Anteil der Rohmaterialien zwischen 70 % und 80 %. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten für BNC im pessimistischen Ansatz einen deutlich grösseren Anteil ausmachen. Im pessimistischen Ansatz entfallen ca. 70 % der Kosten auf BNC, wobei nur ca. 12 % auf Sägespäne entfallen.

Beim optimistischen Ansatz hingegen können 46 % der Gesamtkosten der BNC-Produktion und 25 % den Sägespänen zugeordnet werden (Tabelle 4). Da Teile der Infrastruktur, wie Hacker, Trockner und Sieher, für die Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen nicht benötigt werden, sind sowohl die Infrastrukturkosten als auch die Kosten für elektrische Energie geringer. Die Kosten für die Presse wurden in beiden Berechnungsansätzen mit dem Faktor 0,5 berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass eine kleinere Presseninfrastruktur ausreichend ist. Die Kosten für Personal und Wartung wurden für beide Berechnungsansätze als annähernd gleich angenommen. Allerdings dürften die Instandhaltungskosten aufgrund der einfacheren Anlagenstruktur im Vergleich zu einer Spanplattenproduktionsanlage geringer ausfallen.

Tabelle 5: Grober Kostenvergleich der Produktions- und Rohstoffkosten eines möglichen zukünftigen BNC-Verbundwerkstoffs mit einer Spanplatte, basierend auf dem Kostenmodell von Poppensieker (2010)

Nr.	Kategorien			Faktor		Spanplattenanteil in €		BNC-Verbund pessimistisch		BNC-Verbund optimistisch	
	Kostenkategorien	Subkategorien	Sub-Subkategorien	pessimistisch	optimistisch	Referenz %	Total %	Ergebnis	Anteil in %	Ergebnis	Anteil in %
1	Investitionskosten	Infrastruktur	Holzlager	0,3	0,3	0,3	13	0,1	3,6	0,1	7,1
2			Hacker	0	0	0,7		0		0	
3			Trockner	0	0	1,4		0		0	
4			Sieben	0	0	0,7		0		0	
5			Kleben/Formen	1	0,5	1,3		1,3		0,6	
6			Pressen	0,5	0,5	1,2		0,6		0,6	
7			Nachverarbeitung	1	1	1,0		1		1	
8			Andere	1	1	4,7		4,7		4,7	
9			Gebäude	1	1	1,4		1,4		1,4	
10	Personalkosten			1	1	6	6	6	2,4	6	5,1
11	Wartungskosten			1	0,5	4	4	4	1,6	2	1,7
12	Materialkosten	Holzpartikel		0,7	0,7	44	61	29	12	29	25
13		Bindemittel		9,7	3,2	17		165	67	54	46
14	Energie	Elektrizität	Holzlager	0,3	0,3	0,8	9	0,2	2	0,2	3,6
15			Hacker	0	0	1,5		0		0	
16			Trockner	0	0	1,1		0		0	
17			Sieben	0	0	0,9		0		0	
18			Kleben/Formen	0,5	0,5	0,8		0,4		0,4	
19			Pressen	1,5	1	1,1		1,7		1,1	
20			Nachverarbeitung	1	1	1,6		1,6		1,6	
21		Andere	1	1	1	1		1			
22	Thermische Energie		4,0	2,0	7,2	7	29	12	14	12	
Summe [%]						100		247	100	119	100

Aufgrund der grossen Menge an Wasser, die zur Herstellung der BNC-Verbundwerkstoffe verdampft werden muss, wurden beim pessimistischen Ansatz viermal höhere Kosten in der Kategorie thermische Energie (Nr. 22) angenommen. Der optimistische Ansatz führt zu doppelt so hohen Energiekosten wie bei der Herstellung von Spanplatten. Da die thermische Energie jedoch durch die Verbrennung der firmeneigenen Nebenprodukte erzeugt wird, hat dies nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkosten.

Unter Berücksichtigung des pessimistischen Berechnungsansatzes liegen die Kosten für die Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen bei etwa 250 % der Kosten für Spanplatten. Die Kosten für BNC sind in diesem Szenario der entscheidende Faktor. Im optimistischen Berechnungsansatz würden die Kosten für die BNC-Verbundwerkstoffe auf ca. 120 % im Vergleich zu Spanplatten steigen. In diesem Fall sind die Kosten für BNC der Hauptfaktor, der fast 50 % der Gesamtkosten ausmacht. Die Ergebnisse des Recyclingversuchs zeigen, dass die BNC-Verbundwerkstoffe problemlos recycelt werden können. Die

Wiederherstellung der ursprünglichen mechanischen Eigenschaften wurde bereits mit geringen Mengen an BNC (2 Gew.-%) erreicht. Es kann davon ausgegangen werden, dass nur 20 % der ursprünglich benötigten Menge an BNC (entspricht 2 Gew.-%) während des Recyclingprozesses zugegeben werden müssen, um die ursprünglichen Eigenschaften wiederherzustellen. Dies führt zu einer Kostenreduzierung über mehrere Produktlebenszyklen durch Recycling.

Wenn nur 20 % der Rohstoffkosten für BNC und die für das Recycling erforderlichen Energiekosten berücksichtigt werden, würden die Herstellungskosten bei einem pessimistischen Szenario den Kosten der Spanplattenproduktion nach dem fünften Recyclingzyklus entsprechen. Im optimistischen Szenario, in dem von niedrigeren BNC-Kosten ausgegangen wird, wären die durchschnittlichen Herstellungskosten bereits nach dem ersten Recyclingzyklus niedriger als die der Spanplattenproduktion. Allerdings wurden die Kosten für ein entsprechendes Recyclingsystem zur Rückführung der BNC-Verbundwerkstoffe ebenfalls vernachlässigt. Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die Kosten für BNC aufgrund der leichten Recyclbarkeit des Produktes auf mehrere Produktlebenszyklen verteilen lassen, da nur geringe Mengen an BNC zur Erhaltung der mechanischen Eigenschaften zugeführt werden müssen.

4.8 Bewertung der Umweltauswirkungen

Im Rahmen eines Vergleichs des Treibhauspotenzials (THP) von Spanplatten und BNC-Verbundwerkstoffen wurden sieben verschiedene Berechnungen auf der Grundlage unterschiedlicher Daten durchgeführt. Bei der Herstellung von Spanplatten trägt die Produktion des verwendeten UF-Harzes am meisten (40 % bis 50 %) zum THP bei. Es gibt erhebliche Unterschiede bei den Emissionen des UF-Harzes, je nachdem, ob die Produktion in Europa oder weltweit stattfindet. Der Wert variiert etwa um den Faktor 2. Das gesamte THP pro m³ Spanplatte für den Innenbereich liegt zwischen 205 kgCO₂eq. (Europa) und 270 kgCO₂eq. (weltweit). Insgesamt 22 % des THP können dem für die Produktion verwendeten Holz zugeschrieben werden. Der nächstgrössere Anteil entfällt auf die Emissionen im Zusammenhang mit der Erzeugung der für die Produktion benötigten elektrischen Energie.

Die Emissionen für die Herstellung von BNC machen je nach Ansatz zwischen 80 % und 90 % des gesamten THP bei der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen aus. Die Emissionen für das Holz sind vergleichsweise gering, da es sich um Sägespäne handelt, die als Nebenprodukt bei der Produktion von Schnittholz anfallen. Im Vergleich dazu wird bei der Herstellung von Spanplatten ein erheblicher Anteil an frischem, so genanntem Industrieholz verwendet. Die Emissionen für Energie sind ebenfalls gering, da Holzreste wie Rinde oder Hackschnitzel hauptsächlich für die Bereitstellung von Wärmeenergie verwendet werden. Die Emissionen aus der Erzeugung von elektrischer Energie stellen den zweitgrössten Anteil am gesamten THP dar, sind aber im Vergleich zu den Emissionen aus der BNC-Produktion von geringer Bedeutung.

Ein Vergleich des THP der „Spanplattenproduktion EU“ mit dem THP des „BNC-Verbundwerkstoff Treellessansatzes“ ergab, dass das gesamte THP der Produktion der BNC-Verbundwerkstoffe um ca. 65 % höher ist als das der Spanplattenproduktion.

Die Ergebnisse des Recyclingversuchs zeigten, dass die BNC-Verbundwerkstoffe problemlos recycelt werden können, wobei die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften mit geringen Mengen BNC (2 Gew.-%) wiederhergestellt werden können. Es wurde festgestellt, dass nur 20 % der ursprünglich erforderlichen Menge an BNC (entsprechend 2 Gew.-%) während des Recyclingprozesses zugegeben werden müssen, um die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften wiederherzustellen. Unter der Annahme, dass im ersten Recyclingzyklus nur 20 % der BNC zugesetzt werden müssen, um die gleichen mechanischen Eigenschaften zu erreichen, und alle anderen Prozessparameter konstant bleiben, würde das THP für 1 m³ BNC-Verbundwerkstoff im Durchschnitt 224 kgCO₂eq. für den recycelten und den nicht recycelten BNC-Verbundwerkstoff betragen. Dies wäre vergleichbar mit dem durchschnittlichen THP der Spanplattenproduktion. Jeder weitere Recyclingzyklus würde das durchschnittliche THP weiter senken. Die Daten für den zweiten und dritten Recyclingzyklus zeigen jedoch entsprechend niedrigere Werte von 186 kgCO₂eq. bzw. 167 kgCO₂eq. (Diagramm 18).

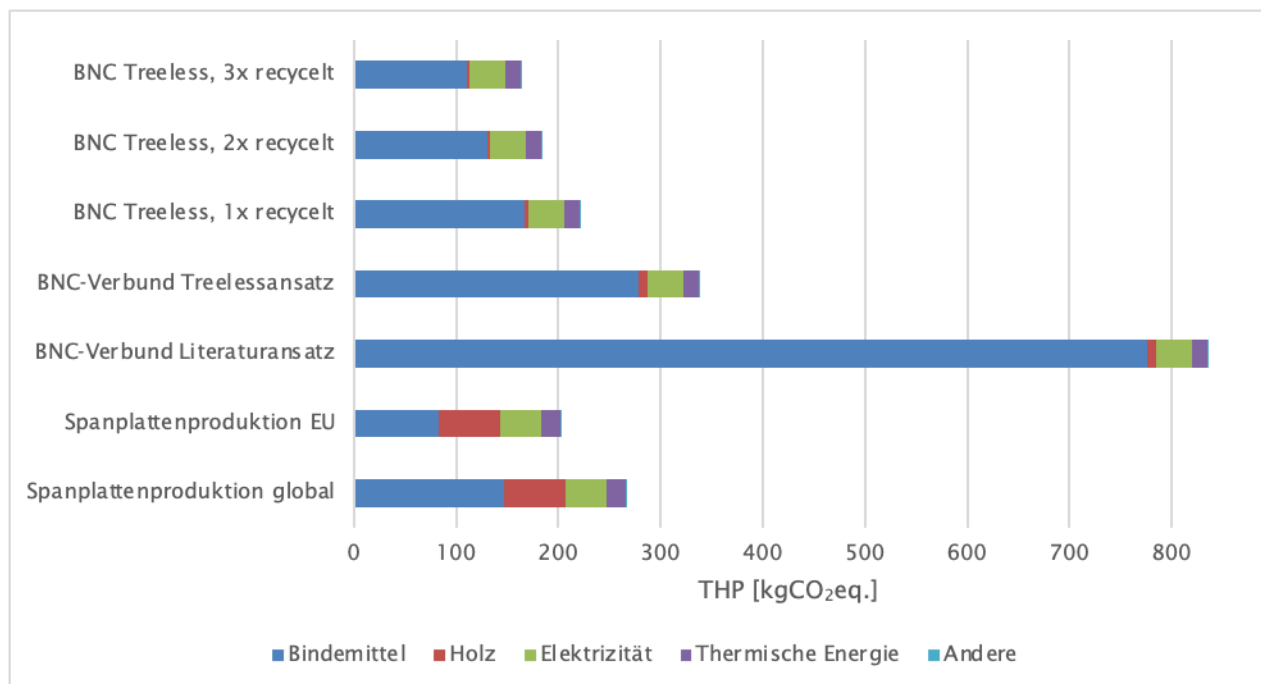


Diagramm 18: Vergleich des THP zur Herstellung von 1 m³ Spanplatten für Innenanwendungen mit zwei Ansätzen für die Herstellung von 1 m³ BNC-Verbundwerkstoff und drei Recyclingzyklen

4.9 Abschätzung der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen in Sägewerken

Der Hauptrohstoff für die Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen, die Sägespäne, fällt als Nebenprodukt in Sägewerken an. Durch die Einführung eines industriellen Produktionsverfahrens für BNC-Verbundwerkstoffe würden daher lange Transportwege für den Hauptrohstoff entfallen. Die thermische Verwertung von Teilen der Nebenprodukte, wie Rinde oder Hackschnitzel, liefert bereits kostengünstige und umweltfreundliche Wärmeenergie, die zur Trocknung der Pressmatte im Herstellungsprozess genutzt werden könnte. Die Trocknung der Pressmatte bzw. die Verdampfung des Wassers ist der Hauptprozess bei der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen. Dieser Hauptprozess ist auch der anspruchsvollste bei der Industrialisierung, da die in der Matte enthaltene Wassermenge grösser ist als z.B. beim Pressen einer Standardspanplatte. Einerseits besteht die Gefahr der Delaminierung während des Pressvorgangs, da sich durch die Verdampfung ein hoher Druck aufbauen kann, andererseits wird für die Verdampfung viel thermische Energie benötigt.

Im Laufe der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Querzugfestigkeit abnimmt, wenn der Feuchtegehalt der Matte weniger als 150 % bis 200 % beträgt. Aufgrund dieser Erkenntnisse muss die Matte mit einem Mindestfeuchtegehalt von etwa 200 % in die Presse gehen. Je nach Pressdruck kann ein Grossteil des Wassers mechanisch herausgepresst werden, der Rest müsste durch Zufuhr von Wärmeenergie verdampft werden. Für diesen Prozess ist eine geeignete Presstechnik erforderlich. Je nach gewünschtem Produktionsvolumen, das auch von der Menge der verfügbaren Sägespäne abhängt, könnte dies eine Etagenpresse statt einer kontinuierlichen Presse sein. Die Grösse einer Anlage zur Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen wäre für ein durchschnittliches Sägewerk in der Schweiz auch deutlich kleiner als für die Spanplattenproduktion. Ausserdem wird ein geeigneter Mischer benötigt, um das BNC mit den Sägespänen zu vermischen. Da es sich hierbei nicht um einen komplexen Prozess handelt, dürften sich die Investitionskosten in Grenzen halten. Untersuchungen zur Recycelbarkeit haben ausserdem gezeigt, dass die Verbundwerkstoffe sehr einfach zu recyceln sind. Nach der Lagerung in Wasser erfordert der Recyclingprozess eine einfache mechanische Zerkleinerung. Dieses Rezyklat könnte dann in den ursprünglichen Produktionsprozess zurückgeführt werden, wobei weniger BNC verbraucht werden würde, als bei einer Erstproduktion. Nach dem Pressvorgang müsste das Produkt konditioniert und geschnitten werden, bevor es verpackt und transportiert werden kann. Die dafür erforderliche Infrastruktur müsste ebenfalls installiert werden.

Tabelle 6: Sammlung der potenziellen Anwendungen im ersten Workshop

Gruppe	Anwendungen
Verpackungsmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> · Transportschutz, Oberflächenschutz · Einwegverpackungen (Entsorgung vor Ort, wie z.B. Elektronik, Weisswaren, Fahrräder) · Support (mechanisch belastbar) für Produkte in Verpackungseinheiten · Füllmaterial, Schüttgut (bei niedriger Dichte möglich?) · Paletten (Einweg, z.B. für Kundenlieferungen) · Transporteinlagen · Interner Transport innerhalb eines Unternehmens (zentrale Sammlung möglich) · Faltschachtel (bei geringer Materialdicke) · Polstermaterial · Formteile zur Aufnahme von Produkten · Einlagen/Formteile (nicht mechanisch belastbar) · Einweg-(Taschen)
Technische Verpackungen	<ul style="list-style-type: none"> · Beschichtete Verpackungen mit kurzer Lebensdauer · Isolationsverpackung (Thermo, Elektrik ESD, Akustik) · Verpackung für ölhaltige Produkte · Hygroskopisches Verpackungsmaterial zur Wasserabsorption
Trays	<ul style="list-style-type: none"> · An die Produktform angepasst zum Schutz beim Transport (z.B. Lebensmittel, Elektronik, Schmuck, Automotive, Pharmaka) · Faserguss (Take Away) · Für medizinische Anwendungen (Material hat keine Zusatzstoffe)
Bioabbaubare Produkte	<ul style="list-style-type: none"> · Setzling-Box · Verpackungen, die dafür ausgelegt sind, sich in der Natur abzubauen · Kompostierbares Verpackungsmaterial (Entsorgung durch den Endkunden im Grünmüll) · Verpackungsmaterial durch Kunden auflösbar · Pflanzentöpfe · Wurzelverankerung (Root anchorage)
Möbel und Aufsteller	<ul style="list-style-type: none"> · Möbel die schadstofffrei sind (keine Emissionen von Klebstoffen) · Verkaufssteller · Thekensteller · Werbebannerträger · Messebau und andere temporäre Strukturen
Innenausbau	<ul style="list-style-type: none"> · Akustikpaneele · Isolation
Sonstige Anwendungen ohne direkt Zuordnung	<ul style="list-style-type: none"> · Hüllen oder Gehäuse (z.B. von Elektronikprodukten) · Spielzeuge · Fashion und Accessoires · Laborverbrauchsmaterialien · Fräsbare Formteile für Spezialprodukte (geringe Losgrößen) (Rückführung des abgetragenen Materials zum Recycling)

Ein zentrales Thema war die Eignung des Verbundwerkstoffs als Anwendung als Verpackungsmaterial oder als Teil von Verpackungssystemen. Die Teilnehmer betonten, dass der Einsatz des schadstofffreien Verbundwerkstoffs besonders für nachhaltige oder hochwertige Produkte interessant sein könnte, bei denen die Verpackung ein Verkaufsargument darstellt. Aber auch als reines Füllmaterial oder Polster zum Produktschutz während des Transports oder Formteile zur Aufnahme von Produkten waren Anwendungen, die häufig genannt wurden. Überlegungen der Teilnehmer waren hier, wie ein Herstellungsprozess aussehen könnte. So wäre es für ein Füllmaterial z.B. denkbar, dass Plattenwerkstoffe mit Perforationen aus dem Verbundwerkstoff zu produziert und diese dann je nach Bedarf und Grösse des zu verpackenden Produkts geteilt werden können.

Es wurde von den Teilnehmern darauf hingewiesen, dass Verpackungen keine lange Lebensdauer haben und nach dem Transport, Verkauf und Entnahme eines Produktes, entsorgt werden. Hier gibt es für Verpackungsmaterialien bestimmte Verordnungen und Regularien, die eingehalten werden müssen. Eine Alternative wäre es, kompostierbare Produkte anzubieten, was mit dem BNC-Verbundwerkstoff möglich wäre. Hier wurden Anwendungen für Verpackungen genannt, die kompostierbar sind und vom Endkunden selbst im Hauskompost entsorgt werden können. Pflanztöpfe für Setzling waren hier ebenfalls eine genannte mögliche Anwendung, da diese von den Wurzeln durchwachsen werden und der BNC-Verbundwerkstoff als Pflanztopf sich im Boden zersetzen könnte.

Weitere Anwendungen die mehrfach genannt wurden, waren Produkte für den Innenausbau. Besonders Akustikpaneele, bei denen die Oberflächenstruktur und das Material des Verbundwerkstoffs gezielt zur Schallabsorption eingesetzt werden könnte. Andere Anwendungen im Innenausbau, die genannt wurden waren temporäre Strukturen, die als Verkaufsdisplay oder auch im Messebau verwendet werden.

4.10.2 Branchenspezifischer Workshop zum Innenausbau

Der zweite Workshop zielte darauf ab, Anwendungen in dem Bereich des Innenausbaus zu finden. Dazu wurden verschiedene Unternehmen kontaktiert, die in dieser Branche tätig sind.

Teilnehmende: Thorsten Pretz – Conica AG
 Cathrin Merscher – Swiss Re
 Melanie Sauerbier – Swiss Re
 Khaled Bouharrou – BE.SIGN
 Lucile Sauvestre – Rematter AG
 Pelin Karamustafaoglu – Wickelhouse Schweiz AG
 Hansueli Hug – Wickelhouse Schweiz AG
 Ivana Camenzind – Wickelhouse Schweiz AG
 Patrick Hangartner – Raumwerke AG
 Patrycja Kucharczyk – Treeless AG
 Adam Korczak – Treeless AG
 Ingo Mayer – Berner Fachhochschule
 Theyge Nenz – Berner Fachhochschule

Die Teilnehmenden haben mit der Methode des Brainwriting Ideen für Anwendungen gesammelt und diese aufgrund von Überschneidungen gruppiert, die in der Tabelle 7 genannt werden.

Tabelle 7: Sammlung der potenziellen Anwendungen im zweiten Workshop

Gruppe	Anwendungen
Möbel & Innenausbau	<ul style="list-style-type: none"> · Möbel (mit oder ohne tragenden Eigenschaften) · Möbelemente (Fronten, Oberflächen) · Rück-/Zwischenwände in Möbeln · Innenräumen, Trennwände (grössere Flächen) · Wandpaneele (mit oder ohne 3D-Formen oder Strukturen an der Oberfläche) · Innenausbau von Häusern, Campern oder Booten (geringes Gewicht) · Verkleidungsplatten oder Formteile (evtl. andere Materialien als Sägespäne binden) · 3D-Dekorelemente für Innenbereiche/Möbel (schadstofffrei) · Optische Gestaltung von Oberflächen/Wänden · 3D-Unterkonstruktionen (Styroporersatz) · Temporäre, modulare Strukturen (Aufsteller, Messebau)
Baustoffe & Dämmung	<ul style="list-style-type: none"> · Schadstofffreie Baumaterialien für Innenbereiche (VOC frei, nicht irritierend, recyklierbar) · Dämmung (zum Einblasen) · Dämmplatten (möglichst dick und Bestimmung vom Lambda-Wert nötig) · Isolation indoor (Temperatur, Akustik) · Stabilisierung von Erde/Lehm basierten Strukturen · Bindemittel für Sperrholzplatten · Dichtungen für Dach/Regen · Akustikpaneele · Leichtbauplatten
Bodenbeläge & Matten	<ul style="list-style-type: none"> · Fussbodenplatten · Unterlagsboden · Elastikmatten (indoor/outdoor) · Fallschutzmatten (Spielplätze) · Dekorative Bodenbeläge und Elemente · Yoga- oder Sportmatten · Biobasierte, recyklierbare und plastikfreie Sportbeläge (Ersatz für Kunstrasen oder Gummibeläge)
Verpackungsmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> · Verpackungen (non-food oder food) · Verpackungen ohne Kontakt zu Feuchtigkeit · Verpackung für Accessoires/Kosmetik
Sonstige Anwendungen ohne direkte Zuordnung	<ul style="list-style-type: none"> · Mode & Accessoires (Taschen, Brillen, Schuhe,...) · Modellbau (Architektur) · Gehäuse (Elektronikprodukte) · Autoindustrie (Interior, Dämmung) · Weinkorken
Verfahren oder weitere Verarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> · Extrusion, Material für 3D-Druck (Designfreiheit) · Laminierung oder Beschichtung (Grafiken oder transparent) · Furnierarbeiten

Das Verfahren des Heisspressens, das zur Herstellung der Prüfkörper und Muster angewandt wurde, wurde hinterfragt und Alternativen, und welche potenziellen Anwendungen sich damit umsetzbar wären, diskutiert. Fände man zum Beispiel ein Prozess, bei dem es möglich ist, dicke BNC-Verbundwerkstoffe herzustellen, könnte das Anwendungen als Dämmstoffe ergeben. Aber auch einen mehrschichtigen Aufbau herzustellen, um dickere Materialien zu erhalten, wurde diskutiert. Der Heisspressprozess

und der Ausgangsstoff mit einem hohen Feuchtegehalt führt, wie es in dieser Studie der Fall war, zu einer grossen Mengen Wasser, das abgeführt (verdampft) werden muss. Auch wurde diskutiert, ob man einen Verbundwerkstoff z.B. auch auf der Baustelle verarbeiten und im Sinne einer in-situ-Trocknung trocknen könnte.

Da die bisherigen Prüfungen an dem Verbundwerkstoff auf die mechanischen Eigenschaften und der Wasseraufnahme abzielten, war die Ästhetik der Oberfläche nachrangig. Für den Innenausbau spielt jedoch Optik eine zentrale Rolle, weshalb hierzu besprochen wurde, dass bereits die Optik der Holzspäne als Dekor möglich wäre. Allerdings wurden Vorschläge eingebracht, dass man die Holzpartikel oder BNC vor dem Heisspressen einfärben könnte oder alternative Füllstoffe, wie Gräser, Blätter oder Blüten verwendet, um eine bestimmte Optik zu erhalten. Aber auch Beschichtungen der Verbundwerkstoffe wären eine Option, um die Optik der Verbundwerkstoffe anzupassen und sie so für Möbel oder Wandverkleidung ansprechend zu machen.

Es wurden auch Anwendungen genannt, die nicht mit Holzwerkstoffen oder anderen biobasierten Verbundwerkstoffen in Verbindung gebracht wurden. So zum Beispiel Fallschutzmatten oder elastische Sportböden, die ein gewisses Mass an Flexibilität und Elastizität aufweisen müssen und derzeit aus PU-gebundenen Gummipartikeln hergestellt werden. Das führte zu der Fragestellung, ob es möglich ist dieses elastische Verhalten durch entsprechende Additive, die während der Herstellung hinzugefügt werden, zu erhalten.

Generell waren sich alle Teilnehmende wie bereits im ersten Workshop einig, dass die Schadstofffreiheit einer der grössten Vorteile des BNC-Verbundwerkstoffs ist. Vor allem bei Produkten für den Innenausbau ist dies nicht zu vernachlässigen, um Emissionen in Innenräumen zu minimieren. Jedoch betonten die Teilnehmenden, dass Produkte für den Baubereich und der Möbelindustrie sehr kostengetrieben sind. Aufgrund der erwartbaren Produktionskosten in dieser Studie ist ein Markteintritt in diesen Bereichen derzeit wenig realistisch. Aussichtsreicher erscheinen hier Nischenmärkte, in denen Nachhaltigkeit, Gesundheit und Design im Vordergrund stehen und die Schadstofffreiheit und Emissionsarmut des BNC-Verbundwerkstoffs ein wichtiges Verkaufsargument sind. Mögliche Anwendungen würden hier eher im hochpreisigen Bereich von Luxusgütern und deren Verpackungen sein. Aus diesem Grund wurde in dem Workshop auch die Modebranche genannt. Mit den entsprechenden Anpassungen an die Herstellung und der Optik wäre es denkbar, hochwertige Produkte oder Accessoires für die Modebranche zu entwickeln. Der Preis spielt in der Modebranche eine untergeordnete Rolle, wodurch biobasierte und kompostierbare Materialien neue Marktsegmente erschliessen könnten.

Die Rezyklierbarkeit wurde in dem Workshop besprochen, da aus Sicht der Teilnehmenden die geringe Wasserstabilität als Chance gesehen werden sollte. Um die Recyclingfähigkeit zu nutzen, wurden unterschiedliche Konzepte und Modelle für zirkuläre Nutzung von Materialien oder Baustoffen genannt. Dazu gehörten Rücknahme- und Mietsysteme, Material-Leasing oder Product-as-a-Service und temporäre Strukturen. Es wurde dazu deutlich gemacht, dass die Logistik funktionieren muss, um Materialien am Ende ihres Lebenszyklus dem Recycling zurückführen zu können.

4.11 Dokumentationsmaterial zur Kommunikation der Ergebnisse im Rahmen der Holzbranche und Lehre BFH-AHB

Für die Kommunikation der Ergebnisse im Rahmen der Holzbranche und der Lehre BFH-AHB wurden folgende Kommunikationsprodukte erzeugt:

- Foliensätze, Vortrag von Prof. Dr. Ingo Mayer am 3. Schweizer Holzindustrie-Kongress, 15.11.2024 in Luzern.
- Unterrichtsmaterial (Foliensätze) im Modul «Holzchemie», 1. Semester, Studiengang BSc Holztechnik, BFH-AHB
- Konzept und Material zur Projektarbeit «Einsatz von Nanocellulose in Bauprodukten» Modul Holzchemie, 1. Semester, Studiengang BSc Holztechnik, BFH-AHB
- Video, Social Media-Kommunikation (Linked-in, BFH-AHB, Treeless AG, im Oktober 2025)

5 Diskussion

Im Rahmen dieses Projektes sollten die Herstellungsparameter und Materialeigenschaften von einem Verbundwerkstoff aus bakterieller Cellulose (BNC) und Sägenebenprodukten (SNP) aus Sägewerken untersucht werden. Es diene vor allem dazu, ein besseres Verständnis für die Bindungseigenschaften von BNC zu Holzpartikeln zu erlangen. Zusätzlich sollte das Recyclingpotenzial des Verbundwerkstoffs untersucht werden, um die Kreislauffähigkeit bewerten zu können. Zusätzlich sollten die erwarteten Produktionskosten für BNC-Verbundwerkstoffe abgeschätzt und eine Ökobilanz zur Bestimmung des Treibhauspotenzials erstellt werden. Mit den Kenntnissen über die Eigenschaften und die Rezyklierbarkeit wurden anschliessend branchenspezifische Workshops durchgeführt, um potenzielle Anwendungen zu diskutieren, zu identifizieren und deren Machbarkeit einschätzen zu können. Als Ergebnisse dieser Workshops sollten Konsortien gebildet werden, die eine Entwicklung konkreter Anwendungen von BNC-Verbundwerkstoffen nach Abschluss dieses Projektes vorantreiben können.

Die mechanischen Eigenschaften von BNC-Verbundwerkstoffen, insbesondere die Querzugfestigkeit und Biegesteifigkeit wurden unter verschiedenen Herstellungsparametern bewertet. Die stärksten Bindungen wurden durch die Verwendung von 3 % NaOH-gewaschener BNC als Bindemittel erreicht. Die höchste Querzugfestigkeit von 1,04 N/mm² wurde bei einem BNC-Gehalt von 20 Gew.-% beobachtet. Es wurde festgestellt, dass eine Erhöhung der Dichte des Verbundwerkstoffs und eine Verringerung der Partikelgrösse zur Verbesserung der Querzugfestigkeit führten. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Feuchtegehalt der Pressmatte unter 200 % sich nachteilig auf die Querzugfestigkeit auswirkte, während die Dickenquellung mit höherer Dichte, geringerem Cellulosegehalt, ungewaschener BNC und grösseren Partikeln zunahm. Die mechanischen Eigenschaften der rezyklierten Verbundwerkstoffe erwiesen sich als etwas schlechter, wenn keine zusätzliche BNC im Recyclingprozess hinzugefügt wurde. Es wurde jedoch festgestellt, dass während des Recyclings die Zugabe einer minimalen Menge von BNC (2 Gew.-%) diese Eigenschaften nahezu wiederherstellen kann. Die mikroskopischen Bilder bestätigten die gleichmässige Verteilung von BNC über die Holzpartikel, und ermöglicht so die erhöhten Anziehungskräfte zwischen den Holzpartikeln durch Ausbildung von Wasserstoffbrücken.

Die zu erwartenden Herstellungskosten von BNC-Verbundwerkstoffen liegen höher als die von Spanplatten, was in erster Linie auf die hohen Kosten für die BNC (ca. 50 % der Gesamtkosten) zurückzuführen ist, wohingegen die Kosten für SNP im Vergleich zu den Holzkomponenten in Spanplatten (Mittellagen- und Decklagenspäne) deutlich niedriger ausfallen. Auch sind die Kosten für die BNC deutlich höher als für herkömmliche Bindemittel, die für Spanplatten verwendet werden. Durch die Möglichkeit des mehrmaligen Recyclings des BNC-Verbundwerkstoffs unter Zugabe geringer Mengen BNC können allerdings die Kosten nach mehreren Recyclingschritten auf ein mit der Spanplattenproduktion vergleichbares Niveau gesenkt werden. Ein ökologischer Vergleich des Treibhauspotenzials (THP) zeigte, dass die Bindemittel für Spanplatten und BNC-Verbundwerkstoffe die wesentlichen Faktoren für das Treibhauspotential in beiden Werkstoffen darstellen. Das vollständige Recycling von BNC-Verbundwerkstoffen mit minimalem zusätzlichem BNC-Anteil verteilt die Umweltauswirkungen jedoch auf mehrere Produktlebenszyklen, was letztlich zu einer Verringerung des Treibhauspotentials auf die funktionelle Einheit führt und dann der BNC-Verbundwerkstoff besser abschneidet.

Zudem sollte abgeschätzt werden, ob es möglich ist die Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen in Schweizer Sägewerken einzuführen. Diese haben den Rohstoff der Sägenebenprodukte (SNP) in grossen Mengen bereits vorliegen und mit der entsprechenden Anpassung der Infrastruktur, könnte eine Möglichkeit bestehen, den SNP eine zusätzliche Wertschöpfung als Bestandteil eines BNC-Verbundwerkstoffs zukommen zu lassen. Jedoch würden auf die Sägewerke die Einführung neuer Prozesse zukommen, für die sie nur bedingt ausgelegt sind. Derzeit sind die Sägewerke darauf spezialisiert Rundholz in Schnittholz zu verarbeiten, aber haben keine Anlagen zum Formen und Pressen von Verbundwerkstoffen. So sind der hohen Feuchtegehalt der Pressmatten von BNC-Verbundwerkstoffen und das Handling dieser beim Verpressen Herausforderungen für die Sägewerke. Hier müsste man sich an anderen Industrien orientieren, die Werkstoffe mit hohem Feuchtegehalt herstellen, wie die Papierherstellung. Auch das Heisspressen ist ein etabliertes Verfahren für Holzwerkstoffe, wo Infrastruktur und Prozesse bekannt und optimiert sind.

Zwei Workshops mit branchenspezifischen VertreterInnen zu potenziellen Anwendungen von BNC-Verbundwerkstoffen wurden durchgeführt. Zum ersten Workshop wurden VertreterInnen der Verpackungs-

branche eingeladen und zum zweiten VertreterInnen aus dem Bereich Innenausbau. In beiden Workshops wurden eine Vielzahl von Ideen gesammelt und Empfehlungen zu Anwendungen oder einem Markteintritt gemacht. Alle Teilnehmenden waren sich einig, dass der BNC-Verbundwerkstoff durch seine Schadstofffreiheit ein grosses Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zu Verbundwerkstoffen mit herkömmlichen Bindemitteln hat. Jedoch sind durch Preisdruck, grosse Konkurrenz oder gesetzliche Verordnungen die Hürden für einen Markteintritt in vielen Branchen gross. Die Vorschläge waren eine Überprüfung und Anpassung des Herstellungsverfahrens des BNC-Verbundwerkstoffs, um die optischen oder mechanischen Eigenschaften anzupassen und sich in Nischenmärkten mit einem sehr spezifischen Produkt positionieren zu können.

5.1 Mechanische Eigenschaften des BNC-Verbundwerkstoffs und Bindungsmechanismen

Im Rahmen der Untersuchung zum Herstellungsprozess der BNC-Verbundwerkstoffe, auf der alle weitere Interpretation der Ergebnisse beruhen, konnten externe Einflussfaktoren weitestgehend ausgeschlossen, deren Einfluss quantifiziert oder abgeschätzt werden. Die Inhomogenität der Rohmaterialien, z.B. unterschiedliche Spangrößenanteile oder die Verwendung von BNC aus unterschiedlichen Produktionschargen, konnten so weitgehend eingeschränkt werden.

Die Zieldichte für die BNC-Verbundwerkstoffe von $0,7 \text{ g/cm}^3$ konnte mit einer durchschnittlichen Dichte der Prüfkörper von $0,68 \text{ g/cm}^3$ mit einer geringen relativen Standardabweichung von $6,8 \%$ erreicht werden. Gleichzeitig hatte der Mittelwert der Ergebnisse für die Querkzugfestigkeit von $0,74 \text{ N/mm}^2$ eine noch geringere relative Standardabweichung von $5,8 \%$. Die geringen Standardabweichungen lassen den Schluss zu, dass der Herstellungsprozess trotz der inhomogenen Rohmaterialien reproduzierbar zu sein scheint. In anderen Studien, z.B. Kojima, Kato et al. (2019), in denen ebenfalls Nanocellulose zur Bindung von Holzpartikeln verwendet wurde, wurde von einer ähnlichen Streuung der Ergebnisse berichtet. Die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses wurde jedoch in keiner der bisherigen Studien kommentiert. Es ist jedoch zu beachten, dass der Stichprobenumfang für die Tests zur Bestimmung der Streuung nur $n=21$ betrug. Um die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses besser beurteilen zu können, wird empfohlen, in zukünftigen Studien eine Referenzprobe herzustellen, z.B. bei Verwendung einer neuen BNC-Charge oder einer neuen Charge von Holzpartikeln. Dies würde es ermöglichen, künftige Schwankungen im Zusammenhang mit der Herstellung, Verarbeitung oder Lagerung der Rohmaterialien besser zu erklären.

Es wurde zudem untersucht, wie sich unterschiedliche Waschansätze für BNC auf die Bindungseigenschaften der Verbundwerkstoffe mit BNC als Bindemittel auswirken. Es zeigte sich ein klarer Trend, dass das Waschen der BNC mit NaOH sich positiv auf die Querkzugfestigkeit auswirkt. Bislang wurde der Einfluss des Waschprozesses auf die Bindungseigenschaften von BNC-Verbundwerkstoffen nicht umfassend untersucht. In Studien für den Einsatz im biomedizinischen Bereich wurde der Einfluss der NaOH-Konzentration auf die Reinigung und Strukturveränderung der BNC untersucht. Han et al. (2019) stellte fest, dass höhere NaOH-Konzentrationen die BNC effektiver von Bakterien befreien. Nishi et al. (1990) berichtete über eine Zunahme der nicht-zellulären Bestandteile in der Waschlösung mit steigender NaOH-Konzentration. In beiden Studien wurde beobachtet, dass die nanoskalige Struktur des BNC bei Konzentrationen zwischen 3% und 5% NaOH beginnende strukturelle Änderungen (Schädigung der Fibrillenstruktur) aufwies.

In anderen Studien wurden Konzentrationen zwischen $0,4 \%$ und 6% NaOH zur Reinigung der BNC verwendet, aber es wurden keine spezifischen Ergebnisse zur Entfernung von Bakterien oder strukturellen Schäden geprüft (Kapitel 2.5). Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass verschiedene NaOH-Konzentrationen unterschiedliche Bindungseffekte in den BNC-Verbundwerkstoffen hervorbringen. Die Temperatur der Waschlösung scheint nicht entscheidend zu sein, sowohl in den vorliegenden Ergebnissen als auch in der Literatur, die von keinem Einfluss der Temperatur im Waschprozess auf die Eigenschaften der BNC berichtet. Dies ist vorteilhaft zu werten, da kein zusätzlicher Energieaufwand erforderlich ist und zu keiner Kostensteigerung bei einer möglichen Industrialisierung des Verfahrens führt. Eine NaOH-Konzentration von 3% scheint geeignet zu sein, um die BNC effektiv zu reinigen und dabei die Nanostruktur intakt zu halten. Die in der Literatur beobachteten Auswirkungen stimmen mit den Ergebnissen dieser Studie überein. Es wäre jedoch von Interesse, genauer zu untersuchen, warum die Entfernung von Bakterien oder die Beschädigung der nanoskaligen Struktur durch eine hohe NaOH-Konzentration die Bindungseigenschaften von BNC und Holzpartikeln beeinflusst. Ausserdem ist zu bedenken, dass die Stichprobengröße in dieser Studie begrenzt war ($n=5-12$ pro Waschansatz).

Die Untersuchung des Einflusses verschiedener BNC-Gehalte auf die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe zeigte deutliche Trends. Mit steigendem BNC-Gehalt nahm die Querkzugfestigkeit zu. Der stärkste Anstieg wurde zwischen 10 Gew.-% und 15 Gew.-% BNC beobachtet, während zwischen 15 Gew.-% und 20 Gew.-% kein ebenso klarer Unterschied feststellbar war. Eine plausible Erklärung könnte sein, dass bei der Analyse der Dichteprofile die Kerndichte für den Verbundwerkstoff mit 15 Gew.-% höher war als bei den Prüfkörpern mit 10 Gew.-% und 20 Gew.-%. Da die Prüfkörper häufig an der Stelle mit der geringsten Dichte versagten, lässt sich die Hypothese aufstellen, dass die Kerndichte einen höheren Einfluss auf die Querkzugfestigkeit als der BNC-Gehalt hat. Es ist zu erwähnen, dass bereits von einem BNC-gehalt von 10 Gew.-% Querkzugfestigkeiten erreicht wurden, die die Mindestanforderung für Spanplatten gemäss der Schweizer Norm EN 312:2010 (P1) übertrafen.

Es zeigten sich Parallelen mit der Studie von Kojima, Kato et al. (2019), in der CNF als Bindemittel verwendet wurde. Auch dort wurde ein Anstieg der Querkzugfestigkeit mit steigendem CNF-Gehalt beobachtet. Allerdings lagen die Werte für die Querkzugfestigkeiten deutlich unter denen der in dieser Studie gemessenen Werte. Trotz grösserer Dicke und der gleichen Dichte, wurden in Kojima, Kato et al. (2019) lediglich Querkzugfestigkeiten von 0,1-0,2 N/mm² erreicht, während in dieser Studie bei gleichem BNC-Gehalt bis zu 0,94 N/mm² nachgewiesen wurden. Dies lässt vermuten, dass BNC eine höhere Bindfähigkeit als CNF aufweist. Im Vergleich zu Amini et al. (2017) zeigen sich abweichende Ergebnisse. Dort wurde bei CNF-gebundenen Verbundwerkstoffen kein signifikanter Zusammenhang zwischen Dichte und Querkzugfestigkeit festgestellt. Auch hier lagen die gemessenen Querkzugfestigkeiten von 0,35-0,45 N/mm² unterhalb der in dieser Studie erzielten Ergebnisse. Dies stützt die Annahme, dass BNC im Vergleich zu CNF effektivere Bindungseigenschaften aufweist. In Bezug auf die Biegesteifigkeit wurde ebenfalls ein Anstieg mit zunehmendem BNC-Gehalt beobachtet, was mit den Ergebnissen von Kojima, Kato et al. (2019) übereinstimmt. Was nochmals bestätigt, dass der BNC-Gehalt einen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Um zu überprüfen, ob der beobachtete geringe Unterschied von 15 Gew.-% und 20 Gew.-% eher auf die Kerndichte zurückzuführen ist oder der BNC-Gehalt einen grösseren Einfluss auf die Ergebnisse hat, wären eine höhere Stichprobengrösse sowie gezielte Variation einzelner Parameter für weiterführende Untersuchungen sinnvoll.

Ein separater Versuch mit variabler Dichte bei konstantem BNC-Gehalt (10 Gew.-%) zeigte, dass die Querkzugfestigkeit mit steigender Dichte zunahm, von 0,52 N/mm² bei 0,45 g/cm³ auf 0,73 N/mm² bei 0,7 g/cm³. Hier scheint die Dichte eine zentrale Rolle zu spielen. Andere Studien (z. B. Hafez et al., 2020) berücksichtigen die Dichte bei den Eigenschaftsbeurteilung leider nicht. Die Ergebnisse legen nahe, dass eine hohe Dichte, insbesondere in dünneren Werkstoffen, zu deutlich verbesserten mechanischen Eigenschaften führt. Bei der Herstellung dickerer Prüfkörper mit gleichzeitig niedriger Dichte (10 mm bei 0,25 g/cm³) wurde eine starke Abnahme der Querkzugfestigkeiten beobachtet (0,15-0,2 N/mm²), was die Bedeutung der Dichte nochmals unterstreicht. In der vorliegenden Studie konnten nur wenige Prüfkörper bei niedriger Dichte und hoher Dicke hergestellt und geprüft werden. Zukünftige Studien sollten diese Bereiche gezielt berücksichtigen, um eine präzisere Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Dichte, BNC-Gehalt und mechanischen Eigenschaften zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl der BNC-Gehalt als auch die Dichte entscheidende Einflussfaktoren für die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Verbundwerkstoffe darstellen.

Die Untersuchung des Einflusses verschiedener Partikelgrössen der Holzspäne auf die Querkzugfestigkeit und die Biegesteifigkeit der BNC-Verbundwerkstoffe ergab, dass kleinere Partikel tendenziell zu einer höheren Querkzugfestigkeit führten, während Prüfkörper mit grösseren Partikel eine höhere Biegesteifigkeit aufwiesen. Die leicht verbesserten Querkzugfestigkeiten bei kleineren Partikeln könnten auf eine gleichmässige Verteilung der BNC auf den Holzpartikeln zurückzuführen sein. Mikroskopische Beobachtungen wurden durchgeführt, um diese Hypothese zu unterstützen. Aufgrund der begrenzten Auflösung des Mikroskops konnte die Hypothese jedoch weder bestätigt noch widerlegt werden.

Für zukünftige Untersuchungen könnte ein dreischichtiger Aufbau des BNC-Verbundwerkstoffs, ähnlich wie bei der Herstellung von Spanplatten, in Betracht gezogen werden. Dadurch können die Eigenschaften der Platten in Bezug auf Querkzugfestigkeit und Biegesteifigkeit je nach Einsatzgebiet und durch die Wahl der Partikelgrösse in den einzelnen Schichten gezielt gesteuert werden. Diese Überlegung ist insbesondere in der industriellen Produktion für verschiedene Anwendungsbereiche relevant. Die Ausbeute der Partikel mit einer Grösse von 0-1 mm betrug 42 %, die der Partikel mit einer Grösse von 1-2,8 mm

33 % und die der grösseren Partikel 25 %. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, alle Partikelgrößen entsprechend ihrer Eigenschaften einzusetzen, um die mechanischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen. Sollten nur kleine Holzpartikel verwendet werden, wären zusätzliche Arbeitsschritte zur Zerkleinerung der grössten Partikel notwendig, was sich negativ auf die Produktionskosten und das THP auswirken würde.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass der Feuchtegehalt der Pressmatte einen deutlichen Einfluss auf die Querzugfestigkeiten der hergestellten Muster hatte. Insbesondere bei einer Reduktion des Feuchtegehalts von 200 % auf 150 % kam es zu einem signifikanten Rückgang der Querzugfestigkeit um rund 40 %. Zwischen 200 % und 400 % wurden hingegen keine wesentlichen Unterschiede festgestellt. Damit wurde gezeigt, dass ein gewisser Mindestfeuchtegehalt erforderlich ist, um eine ausreichende und gleichmässige Verteilung auf den Holzpartikeln und Wirksamkeit der BNC als Bindemittel zu gewährleisten. Aufgefallen ist ausserdem, dass vor dem Verpressen die Materialien mit einem geringeren Feuchtegehalt deutlich schwieriger zu vermischen waren.

Die zweite Hypothese, dass es zu einem starken Auswaschen von BNC während der Herstellung kam, konnte ebenfalls durch die vorliegenden Ergebnisse widerlegt werden. Es wurde zwar beobachtet, dass bei einem höheren Feuchtegehalt der Pressmatte mehr Wasser während des Pressvorgangs austrat. Die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe, die mit einem Feuchtegehalt der Pressmatte zwischen 200 % und 400 % hergestellt wurden, zeigten jedoch keine Verschlechterung, obwohl während des Pressvorgangs weniger Wasser austrat. In der von Yue et al. (2022) veröffentlichten Studie wurde ein noch höherer Feuchtegehalt verwendet. Auch hier wurde von keinem Auswaschen der BNC berichtet. Während in anderen Studien, wie z. B. bei Kojima, Kato et al. (2019) und Amini et al. (2017), mit einer Mattenfeuchte von ca. 350 % gearbeitet wurde, wurde auch hier der direkte Einfluss des Feuchtegehalts nicht weiter untersucht. Yue et al. (2022) verwendeten sogar extrem hohe Mattenfeuchten (> 2000 %) ohne dokumentierte Auswaschung.

Ein zusätzlicher Einflussfaktor liegt in der Vorbehandlung der BNC. Peng et al. (2012) und Klemm, Kramer et al. (2011) konnten zeigen, dass die Trocknung von Nanocellulose unter einem bestimmten Feuchtegehalt aufgrund des Verlusts der nanoskaligen Struktur zu einem Verlust der Bindungseigenschaften führen kann. Die für die Herstellung des BNC-Verbundwerkstoffs mit einer Mattenfeuchte von 150 % verwendete BNC wurde zuvor einem Trocknungsprozess unterzogen, der zu einem Feststoffgehalt von 6,77 % führte. Es ist möglich, dass die nanoskalige Struktur während des Trocknungsprozesses beeinträchtigt wurde, was zu einer Verringerung der Bindungseigenschaften und damit zu einer niedrigeren Querzugfestigkeit geführt haben könnte.

Für eine mögliche industrielle Anwendung sind diese Ergebnisse besonders relevant. Ein Mindestfeuchtegehalt von ca. 200 % erscheint notwendig, liegt jedoch deutlich über den typischen Werten bei der Spanplattenherstellung. Dies bringt einen erheblichen Energieaufwand zur Wasserverdampfung mit sich und auch die Abführung und Wiederaufbereitung des Wassers hätten, bei einem hohen Feuchtegehalt, einen grösseren Umfang. In diesem Zusammenhang könnte ein Kaltpressverfahren eine interessante Alternative darstellen. Stärkeres mechanisches Auspressen und anschliessendes Trocknen mittels Heissluft könnten geringere Feuchtwerte ermöglichen, den Energiebedarf senken und somit sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bieten.

Die Wasserstabilität der hergestellten Verbundwerkstoffe wurde durch Dickenquellung und Wasseraufnahme bewertet. Es zeigte sich, dass das Waschen der BNC mit steigenden NaOH-Konzentrationen die Wasseraufnahmefähigkeit und die Dickenquellung deutlich reduzierte. Während Prüfkörper mit ungewaschener BNC eine Dickenquellung von 105 % aufwiesen, sank dieser Wert bei mit 6 %igen NaOH-Lösung gewaschenen Prüfkörpern auf 63 %. Auch der BNC-Gehalt hatte einen Einfluss. Prüfkörper mit einem BNC-Gehalt von 10 Gew.-% quollen etwa 20 % stärker als solche mit 15 Gew.-% oder 20 Gew.-%.

Prüfkörper mit kleiner Partikelgrösse und geringerer Dichte zeigten die geringste Dickenquellen (ca. 50 %). Dieser Trend bestätigte sich auch in der Wasseraufnahme, bei der Werte zwischen 170 und 210 % beobachtet wurden. Damit weisen Materialien mit höherer Neigung zum Quellen auch eine höhere Wasseraufnahme auf. Dieser Zusammenhang zeigte sich durchgängig durch alle Versuche. Im Vergleich zur Literatur lagen die in dieser Studie gemessenen Werte über den meisten Referenzwerten. Amini et al. (2017) ermittelten bei CNF-gebundenen Platten Wasseraufnahmequoten von 120 % bis 140 % und Dickenquellungen zwischen 40 % und 70 %. Diese Unterschiede könnten auf mehrere Faktoren zurückzu-

führen sein. Die in der vorliegenden Studie hergestellten Prüfkörper waren mit ca. 3 mm deutlich dünner, hatten geringere Dichten und kleinere Partikelgrößen. Ähnliche Trends wurden in der Studie von Kojima, Kato et al. (2019) festgestellt, in der Dickenquellungen zwischen 70 % und 90 % abhängig vom CNF-Gehalt gemessen wurden. Auch hier nahm die Dickenquellung mit höherem Celluloseanteil ab. Weitere Unterschiede ergeben sich aus den verwendeten Partikelgrößen. In der Studie von Kojima, Isa et al. (2014) wurden sehr feines Holzmehl mit einer Korngrösse von durchschnittlich 130 µm verwendet. Die resultierenden Verbundwerkstoffe wiesen sehr niedrige Dickenquellungen (ca. 25 %) und Wasseraufnahmewerte (ca. 65 %) auf. Dies bestätigt, dass die Partikelgrösse einen erheblichen Einfluss auf die Wasserstabilität hat. Grössere Partikel führen zu einer erhöhten Quellneigung, möglicherweise durch eine geringere Packungsdichte und grössere Porenräume.

Insgesamt zeigt sich, dass die Dickenquellung durch verschiedene Parameter beeinflusst werden kann. Dazu zählen u.a. Waschverfahren, BNC-Gehalt, Dichte und Partikelgrösse. Die Wasseraufnahme hingegen scheint innerhalb gewisser Grenzen weniger sensitiv auf diese Änderungen zu reagieren. Diese Beobachtung deckt sich auch mit den Ergebnissen aus der Literatur. Ein signifikanter Unterschied in der Wasserstabilität zwischen CNF- und BNC-gebundenen Materialien konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Die Vergleichbarkeit der Studien ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Materialien, Partikelgeometrien und Dicken der Prüfkörper eingeschränkt. Festzuhalten bleibt, dass die Wasseraufnahme und einer mittleren Quellung von 72 % aller untersuchten biobasierten Verbundwerkstoffen deutlich über der Mindestanforderung an UF-gebundenen Spanplatten von 25 % liegt (SN EN 312:2010). Trotz der geringeren Wasserbeständigkeit könnte dies für bestimmte Anwendungen, vor allem etwa im Hinblick auf eine vereinfachtes Recycling, vorteilhaft sein. Die geringere Stabilität im Wasser begünstigt die Auflösbarkeit der Verbundwerkstoffe am Ende ihres Lebenszyklus, was wiederum für einen einfachen Recyclingprozess von Vorteil sein kann.

Mikroskopische Aufnahmen, die entweder mit einem Rasterelektronenmikroskop oder einem optischen Lichtmikroskop gemacht wurden, dienten dazu die Verbindung zwischen BNC und Holzpartikeln sichtbar zu machen und die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen auf struktureller Ebene erklären zu können. Trotz Schwierigkeiten aufgrund ungleichmässiger Prüfkörper, geringer Kontraste, zwischen Holz und BNC und Einschränkungen bei der Auflösung war es möglich, die Verbindung zwischen Holzpartikeln und BNC sichtbar zu machen. Die Bilder in Lee, Ho et al. (2012) zeigen die Bindung von BNC und Sisalfasern und ähneln denen von BNC und Holzpartikeln, die in dieser Studie in Abb. 7 und 8 aufgenommen wurden. In Tajvidi et al. (2016) wurde beobachtet, dass die BNC teilweise in die gebrochene Holzstruktur eindringt, was auch in dieser Studie beobachtet werden konnte (Abb. 4). Tajvidi et al. (2016) und Tayeb et al. (2018) stellten die Hypothese auf, dass das Eindringen der Cellulose in die Poren zum Bindungsprozess beitragen könnte. Diese Hypothese wurde durch die mikroskopischen Bilder gestützt, die zeigten, dass die BNC in die Lumen der Holzzellen eindringen oder diese benetzen.

5.2 Rezyklierbarkeit von BNC-Verbundwerkstoffen

Ein wesentlicher Vorteil der BNC-Verbundwerkstoffen gegenüber Spanplatten ist der einfachere Recyclingprozess. Die Bindungskräfte in den BNC-Verbundwerkstoffen wurden durch Zugabe von Wasser gelöst und die SNP-Partikel konnten anschliessend mechanisch ohne hohen Energieaufwand getrennt werden. Das zerkleinerte Material wurde anschliessend mit der Zugabe von unterschiedlichen Mengen BNC erneut verpresst. Die Ergebnisse zeigten, dass die Querkzugfestigkeit und die Biegesteifigkeit der Verbundwerkstoffe ohne Zugabe von BNC bei dem Recyclingprozess etwas abnahm. Die Zugabe von nur geringen Mengen BNC (2 Gew.-%) führte zur Wiederherstellung der ursprünglichen Eigenschaften, zumindest hinsichtlich der Querkzugfestigkeit. In der recherchierten Literatur konnte nur eine Studie von Yue et al. (2022) identifiziert werden, die sich mit den Auswirkungen des Recyclings auf die mechanischen Eigenschaften befasste. In dieser Studie wurden die Auswirkungen von drei Recyclingstufen auf die Zugfestigkeit analysiert, wobei während des Recyclingprozesses keine zusätzliches BNC hinzugefügt wurde. Selbst nach der dritten Recyclingstufe wurde keine Abnahme der Zugfestigkeit beobachtet. Es ist jedoch zu beachten, dass der BNC-Gehalt der analysierten Prüfkörper zwischen 6 und 60 Gew.-% lag, deutlich über den in dieser Studie verwendeten Mengen (10 bis 20 Gew.-%). Es ist nicht überraschend, dass bei einem hohen BNC-Gehalt von mehr als 20 Gew.-% ausreichend BNC im System vorhanden ist, um während des Recyclingprozesses neue Wasserstoffbrückenbindungen zu bilden. Bei einem BNC-Gehalt von 6 bis 19 Gew.-% wurde jedoch von Yue et al. (2022) ebenfalls keine Abnahme der Zugfestigkeit beobachtet. Da in der vorliegenden Studie nur die Auswirkungen auf die Querkzugfestigkeit

und Biegesteifigkeit überprüft wurden, ist ein Vergleich der Ergebnisse beider Studien aufgrund fehlender Zugversuche nur in begrenztem Umfang möglich.

Eine mögliche Erklärung für die leichte Abnahme der mechanischen Eigenschaften nach dem ersten Recyclingprozess ohne Zugabe von neuem BNC könnte das Phänomen der Hornifizierung sein, das von Fernandes Diniz et al. (2004) beschrieben wurde. Der Begriff Hornifizierung beschreibt das Auftreten irreversibler Wasserstoffbrückenbindungen nach dem Trocknungsprozess von Cellulose. Dementsprechend ist es möglich, dass ein Teil der Cellulose hornifiziert ist und daher während des Recyclings keine neuen Wasserstoffbrückenbindungen bilden konnte, was zu einem leichten Abfall der mechanischen Eigenschaften führen kann, wie er in dieser Studie ebenfalls beobachtet wurde. Im Hinblick auf die Materialanwendungen stellt die geringe Wasserstabilität eine Herausforderung dar, während die einfache Recyclingfähigkeit eine grosse Chance bietet. Dieser Aspekt sollte bei der Entwicklung von Anwendungen für BNC-gebundene Materialien unbedingt berücksichtigt werden.

5.3 Produktionskosten von BNC-Verbundwerkstoffen

Die Ergebnisse des Kostenvergleichs zwischen der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen und der Herstellung von Spanplatten zeigten, dass die Kosten für die Bindemittel bei beiden den grössten Kostenfaktor darstellen. Die Kosten für Investitionen, Personal und Wartung hatten einen untergeordneten Anteil an den Gesamtkosten. Trotz des erheblichen Verbrauchs an thermischer Energie waren die Kosten vergleichsweise gering, da die Energie für die Herstellung der Verbundwerkstoffe durch thermische Verwertung anderer Sägenebenprodukte erzeugt wird. Insgesamt sind die Produktionskosten für BNC-Verbundwerkstoffe höher als für Spanplatten. Durch die Rezyklierbarkeit der BNC-Verbundwerkstoffe können die Kosten für Rohstoffe jedoch auf mehrere Produktlebenszyklen verteilt werden, wodurch die Gesamtkosten mit denen der Spanplattenproduktion konkurrieren können. Die detaillierte Kostenanalyse von Poppensieker (2010) zur Veranschaulichung der Kostenstrukturen für die Herstellung von Spanplatten wurde sowohl für den Vergleich als auch als Grundlage für die Ergebnisse der Kosten für BNC-Verbundwerkstoffe herangezogen. Das Verfahren zur Herstellung von Spanplatten für den Innenbereich sind vergleichbar mit der von BNC-Verbundwerkstoffen, weshalb die wesentlichen Prozesse des entsprechenden Kostenmodells an die Herstellung BNC-Verbundwerkstoffen angepasst wurden. Der Vergleich ermöglicht eine Einschätzung der grössten Kostenblöcke und einen groben Vergleich mit den Produktionskosten von Spanplatten. Dieser basiert auf fundierten Annahmen und Kostenschätzungen von Experten.

Die Daten zu den Rohstoffkosten für die Sägenebenprodukte basieren auf den aktuellen Marktpreisen der OLWO AG. Die angenommenen Kosten für BNC, die den Hauptkostentreiber darstellt (1–3 CHF/kg trockenes BNC), basieren auf Schätzungen der Treelss AG und sind etwas optimistischer als die Kosten in der Literatur angegebenen Daten (3–5 CHF, Cowie et al. 2014). Durch das Recycling, bei dem 100 % des verwendeten Rohmaterials wiederverwendet werden können und nur geringe Mengen an zusätzlichem Bindemittel benötigt werden, können die Kosten auf mehrere Produktlebenszyklen verteilt werden. Diese Annahme berücksichtigt jedoch nicht die Kosten für die Umsetzung eines Rückgabekonzeptes, die je nach entwickeltem Produkt variieren kann und daher nicht quantifiziert wurden. Dennoch ist offensichtlich, dass das Recycling des Verbundwerkstoffs einen erheblichen Einfluss auf die Kostensenkung hat.

Der durchgeführte Kostenvergleich zeigt, dass eine Annäherung an die Produktionskosten von Spanplatten möglich erscheint, wenn die BNC-Verbundwerkstoffe mehrmals recycelt werden. Es ist zu erwarten, dass die Kosten für die zukünftige Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen hauptsächlich von den Produktionskosten der BNC selbst bestimmt werden. Die von Hussain et al. (2019) angekündigten Fortschritte in der industriellen Entwicklung der BNC-Produktion sollte Reduktion der Herstellungskosten von BNC und damit auch von BNC-Verbundwerkstoffen ermöglichen. Die Treeless AG arbeitet derzeit an der Herstellung von BNC in einer weitestgehend automatisierten Produktion, was sich positiv auf die Kosten auswirken sollte.

5.4 Bewertung der Umweltauswirkungen

Das Treibhauspotenzial (THP) von Spanplatten und BNC-Verbundwerkstoffen wurde verglichen. Da noch kein Herstellungsverfahren für BNC-Verbundwerkstoffe etabliert ist, gibt es in der Literatur ebenso keine Lebenszyklusanalyse für den Produktionsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen. Daher wurden Daten

für die Produktemissionen von Spanplatten verwendet und an den erwarteten Produktionsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen angepasst, wie es bereits für die Berechnung der Produktionskosten gehandhabt wurde.

Die Berechnung des THP von Spanplatten ergab, dass die UF-Harzproduktion erheblich zum THP der Spanplatten beiträgt und 40-50 % des Gesamtwerts ausmacht. Das THP der Spanplattenproduktion schwankt zwischen 205 kgCO₂eq/m³ für Europa und weltweit 270 kgCO₂eq/m³. Im Vergleich sind die Schritte zur Herstellung der BNC die Hauptemissionsquelle für BNC-Verbundwerkstoffe und machen 80-90 % der Gesamtemissionen aus. Zur Abschätzung des THP des Produktionsprozesses von BNC-Verbundwerkstoffen wurden Daten von Forte et al. (2021) und Araújo e Silva et al. (2020) herangezogen, die einen teilweise industrialisierten Prozess beschreiben, der sich allerdings in einigen Aspekten vom erwarteten Herstellungsprozess der Treeless AG (siehe Kapitel 2.9) unterscheidet. Daher wurden einige Anpassungen vorgenommen, die in Kapitel 3.7 ausführlich beschrieben werden. Ein erheblicher Teil, der in der Literaturbeschreibung des BNC-Produktionsprozesses identifizierten Emissionen, ist auf die Herstellung des Nährmediums für die BNC-Produktion zurückzuführen. Im Fall der Treeless AG treten die oben genannten Emissionen nicht auf, da das Nährmedium nicht speziell hergestellt wird, sondern ein Abfallprodukt oder Nebenprodukt aus der Apfelsaftproduktion ist. In dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass der Grossteil der bei der Apfelsaftproduktion entstehenden Emissionen auf das Hauptprodukt Apfelsaft und nicht auf das Nebenprodukt zurückzuführen ist. In der Praxis wird bei solchen Prozessen häufig eine wirtschaftliche Zuordnung einer Massenzuordnung vorgezogen, da der wirtschaftliche Wert des Apfelsafts deutlich höher ist als der des Nebenprodukts. Eine solche Annahme ermöglicht eine genauere Beschreibung der Emissionszuordnung. Darüber hinaus sind Teile der Emissionen aus den von Forte et al. (2021) beschriebenen nachgelagerten Prozessen im Produktionsprozess der Treeless AG nicht zu finden. Die Emissionen aus diesen Prozessen resultieren in erster Linie aus der Erzeugung der verbrauchten elektrischen Energie. Der grösste Anteil entfiel auf den Mahlprozess. Dieser Prozess ist für den Produktionsansatz der Treeless AG ebenfalls nicht relevant. Der von Forte et al. (2021) beschriebene Herstellungsprozess unterscheidet sich in einigen wichtigen Prozessschritten von dem der Treeless AG. Was dazu führte, dass bestimmte Einflüsse für die Berechnung des THP von BNC-Verbundwerkstoffen nicht im vollen Umfang berücksichtigt werden konnten. Mit optimierten Produktionsprozessen ist daher ein geringeres THP als aktuell beschrieben zu erwarten.

Die BNC-Verbundwerkstoffe, die nach dem Treelessansatz hergestellt wurden, weisen ein um 66 % höheres THP als Spanplatten auf. Durch das Recycling der BNC-Verbundwerkstoffe werden diese Emissionen jedoch auf mehrere Produktlebenszyklen verteilt. Folglich sind die durchschnittlichen Emissionen aufgrund der geringeren Menge an BNC, die beim Recycling hinzugefügt werden muss, niedriger. Daher wird erwartet, dass das THP für BNC-Verbundwerkstoffe nach mehreren Recyclingzyklen vergleichbar oder sogar niedriger als das THP der Spanplattenproduktion sein könnte.

5.5 Industrialisierung der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen in Sägewerken

Die Ergebnisse der Bewertung der Industrialisierung des Herstellungsprozesses für BNC-Verbundwerkstoffe deuten darauf hin, dass die grundlegenden Voraussetzungen in Sägewerken teilweise gegeben sind. Die Infrastruktur und ein wichtiges Rohmaterial ist mit den Sägenebenprodukten (SNP) sowie thermische Energie sind bereits vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass die Menge von SNP in Sägewerken auch in Zukunft auf einem vergleichbaren Niveau bleiben wird. Rinde wird in Sägewerken häufig zur Erzeugung von thermischer Energie verwendet und stellt ein Nebenprodukt dar, das wahrscheinlich auch weiterhin verfügbar sein wird. Was die Maschineninfrastruktur betrifft, so sind nur wenige Maschinen in Sägewerken für den BNC-Produktionsprozess geeignet. Abgesehen von der Presse sind die betreffenden Maschinen jedoch nicht besonders komplex, sodass die Investitionskosten vergleichsweise überschaubar sein dürften.

Die Integration des Verfahrens in Produktionsanlagen von anderen Holz- oder Plattenwerkstoffen sollte geprüft werden, da dort möglicherweise bereits geeignete Infrastrukturen zum Pressen bestehen. Jedoch sind auch diese Produktionsanlagen für Verbundwerkstoffe mit geringeren Feuchtegehalten und Wassermengen ausgelegt. Bei der Bewertung der Industrialisierung sind die ermittelten Eigenschaften der BNC-Verbundwerkstoffe zu berücksichtigen. Neben mechanischen Kennwerten wie Querzugfestigkeit und Biegesteifigkeit sind auch Wasseraufnahme, Quellmass und Recyclingfähigkeit entscheidend für die Entwicklung eines geeigneten Materialkonzepts. Dieses Konzept beeinflusst den Herstellungsprozess und die Systemgestaltung massgeblich. Künftige Untersuchungen sollten daher auf ein klar

definiertes Materialkonzept aufbauen, um Produkteigenschaften gezielter kontrollieren, analysieren und optimieren zu können. Eine konkrete Anwendung würde zudem eine fundiertere Bewertung des Industrialisierungspotenzials ermöglichen.

5.6 Zukünftige Anwendungsfelder von BNC-Verbundwerkstoffen

Um potenzielle Anwendungen für die in dieser Studie hergestellten BNC-Verbundwerkstoffe und dem erlangten Wissen für die Bindungseigenschaften von BNC zu sammeln, wurden zwei branchenspezifische Workshops mit Vertretungen aus der Verpackungsindustrie und dem Innenausbau durchgeführt. Die Teilnehmenden zu den Workshops haben in einem Brainwriting ihre Ideen für Anwendungen gesammelt und anschliessend wurden ausgewählte Anwendungen oder Anwendungsfelder diskutiert, um ihre Realisierbarkeit einschätzen zu können.

Die Ergebnisse beider Workshops zeigten, dass der BNC-Verbundwerkstoff ein breites Anwendungspotenzial hat, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Ideen gesammelt wurden. Die Teilnehmenden sahen darin vor allem ein schadstofffreies Material, das neben dieser Schadstofffreiheit auch gestalterisch vielseitig einsetzbar wäre. Gleichzeitig wurde schnell deutlich, dass zwischen der in dieser Studie hergestellten Werkstoffmuster und einer technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer Anwendung noch ausgiebiger Entwicklungsbedarf besteht. Da es aber auch ein Ziel des Projekts war, Kontakte in die Industrie zu erhalten, um für weitere Entwicklungen und Innovationen Konsortien zu bilden, waren die Workshops ein gutes Mittel, um erste Kontakte zu potenziellen Partnern zu knüpfen.

Die Teilnehmenden waren sich einig, dass die Optimierung der BNC-Produktion und Entwässerung entscheidend ist, um die industrielle Herstellung wirtschaftlich zu gestalten. Hier besteht ein hoher Forschungsbedarf in Bezug auf Prozesssteuerung, Ressourcennutzung und Reproduzierbarkeit.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, die in dieser Studie umfangreich getestet und bewertet wurden, gab es von Teilnehmenden keine Zweifel, dass es viel Potenzial für Anwendungen gibt. Für spezifische Anwendungen wäre es jedoch notwendig diese anpassen zu können. Ein Beispiel sind Sportbodenbeläge, die derzeit aus PU-gebundenen Gummipartikeln produziert werden. Dadurch hat das Material eine gewisse Elastizität, die mit dem BNC-Verbundwerkstoff derzeit nicht erreichbar ist. Jedoch ist es denkbar mit anderen lignocellulosebasierten Füllstoffen oder Zusätzen die Eigenschaften auf eine spezielle Anwendung zuzuschneiden. Mit anderen Füllstoffen könnte auch die Optik der Verbundwerkstoffe angepasst werden. Gerade entsprechen diese der Farbe und Struktur der verwendeten Holzpartikel. Als eine Möglichkeit wurde auch die Beimischung von Pflanzenteilen von Einjahrespflanzen (z.B. Gräser, Blätter oder Blüten) gesehen, um die gestalterischen Möglichkeiten zu erhöhen und weitere Anwendungsfelder zu erschliessen. Beschichtungen mit gefärbten BNC-Filmen oder anderen Materialien sind ebenfalls zu überprüfen. Diese Anpassungen an der Optik der Verbundwerkstoffe ist besonders für Anwendungen im Innenbereich interessant, wo Ästhetik und Haptik eine grosse Rolle spielen. Gleichzeitig muss beachtet werden, inwieweit sich die Zugabe von Additiven und Beschichtungen auf die mechanischen Eigenschaften, der Wasseraufnahme und dem einfachen Recyclingprozess auswirken, da vor allem das Recycling ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal des BNC-Verbundwerkstoffs im Vergleich zu gängigen Verbundwerkstoffen ist. Bezogen auf die Herstellung solcher Verbundwerkstoffe in der Sägewerkinfrastruktur gibt es noch viele Unbekannte, wie weit dies umsetzbar ist. Der Herstellungsprozess wird sehr stark von der Ausführung der Produkte abhängig zu sein. Ein einfaches Heisspressen scheint noch machbar, aber komplexere Prozesse sind nur mit entsprechender Infrastruktur oder Platz umzusetzen, was die Möglichkeiten für Sägewerke als Produktionsstätte ausschliessen könnte.

Ein wesentlicher Diskussionsschwerpunkt galt den Themen Recyclingfähigkeit und Konzepte zur Umsetzung des Recyclings. Der BNC-Verbundwerkstoff bietet durch seine Rezyklierbarkeit biologische Abbaubarkeit und den Verzicht auf synthetische Bindemittel Vorteile gegenüber anderen Verbundwerkstoffen. Besonders für temporäre und modulare Anwendungen, wie im Messebau, Bühnenbau oder bei kurzlebigen Verpackungslösungen, bietet sich es an, das Recycling umfänglich zu nutzen. In diesen Bereichen steht nicht die Langzeitbeständigkeit im Vordergrund, sondern eine einfache Rückführung in den Kreislauf. Selbst für Anwendungen, bei denen nur Teile des Verbundwerkstoffs recycelt werden können, wurde hier ein grosses Potenzial gesehen. Die Diskussion zeigte jedoch auch, dass die eigentliche Herausforderung in der Logistik des Recyclings liegt. Um ein funktionierendes Kreislaufsystem zu etablieren, müssen geeignete Rücknahme- und Sammelstrukturen geschaffen werden. Denkbar sind Geschäftsmodelle wie Material-Leasing, Abonnement-Systeme oder Product-as-a-Service, bei denen Her-

steller die Verantwortung für Rücknahme und Wiederverwertung übernehmen. Derzeit gibt es für Verbundwerkstoffe wenig Konzepte, die man als Beispiel heranziehen könnte. Häufig ist es so, dass der Hersteller eines Produkts selbst die Rücknahme und das Recycling durchführt. So ist es z.B. bei Interface, einem Hersteller für Teppichfliesen, der Fall. Mit der Einführung eines solchen Konzepts liesse sich zusätzlich die Fragestellung zu einer fachgerechten Entsorgung klären und man würde den Kunden die Verantwortung abnehmen.

Aus wirtschaftlicher Sicht wurde festgestellt, dass der Verbundwerkstoff aufgrund der aktuellen Produktionskosten noch nicht konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Holzwerkstoffen ist. Besonders in Märkten wie der Bau- oder Möbelindustrie ist der Preisdruck sehr hoch, was einen Markteintritt erschwert. Zwar ist erwartbar, dass mit einer Senkung der Produktionskosten für die BNC auch die Herstellungskosten entsprechender Verbundwerkstoffe geringer sind. Die Berechnungen der Produktionskosten in dieser Studie wurden jedoch mit vielen Annahmen gemacht, die bei einer Umsetzung klarer dargestellt werden müssten. Deshalb ist es notwendig im Falle einer Anwendung diese genauer zu prüfen und die Berechnungen anzupassen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es allerdings nur möglich, die Kosten mit einem funktionierenden Recyclingkonzept zu senken. Daher wurde empfohlen, sich zunächst auf Nischenmärkte zu konzentrieren, in denen ökologische Werte, Design und Innovation im Vordergrund stehen. Dazu gehören der Luxusverpackungssektor, der Innenausbau im Premiumbereich, aber auch die Modeindustrie, die zunehmend nachhaltige Materialien sucht. In diesen Bereichen spielt die Preisakzeptanz eine geringere Rolle, während Materialästhetik und Storytelling entscheidend für den Markterfolg sind. Der BNC-Verbundwerkstoff könnte hier mit den Argumenten „100 % biobasiert, plastikfrei und kompostierbar“ punkten. Eine gezielte Kommunikationsstrategie und Kooperationen mit Marken, die Nachhaltigkeit als Teil ihrer Identität begreifen, könnten helfen, den Markteintritt zu beschleunigen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Ziel des Projektes war es, die Bindungseigenschaften von bakterieller Nanocellulose (BNC) und Holzpartikeln zu bewerten und den Einfluss einzelner Formulierungs- und Prozessparameter aufzuklären. Zudem sollte die Recyclingfähigkeit der hergestellten BNC-Verbundwerkstoffe bewertet werden. Ein weiteres Ziel der Studie war es, das Potenzial für die Industrialisierung der Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen innerhalb der Infrastruktur eines Sägewerks zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt insbesondere auf der Verwendung von anfallenden Sägenebenprodukten und der in Sägewerken verfügbaren thermischen Energie lag. Ein weiterer Zweck dieser Studie war die Abschätzung der Herstellungskosten von BNC-Verbundwerkstoffen. Ausserdem sollte im Rahmen der Studie eine Ökobilanz erstellt werden, um das Treibhauspotenzial der Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen bewerten zu können. Schliesslich wurden branchenspezifische Workshops durchgeführt, um potenzielle Anwendungen für den BNC-Verbundwerkstoff zu definieren und deren Machbarkeit im Sinne einer erfolgreichen Innovation auf dem Markt zu diskutieren.

Die Variation der Produktionsparameter zeigte deutliche Einflüsse auf die Materialeigenschaften. Eine NaOH-Konzentration der Waschlösung für die BNC von bis zu 3 % sowie höhere Dichte, kleinere Holzpartikel und erhöhter BNC-Gehalt in den Verbundwerkstoffen verbesserten insbesondere die Querkzugfestigkeit. Mikroskopische Aufnahmen belegten die Benetzung und eine effektive Verbindung der Holzpartikel durch BNC. Es wurde ausserdem beobachtet, dass Feuchtegehalte in der Matte vor dem Verpressen von unter 200 % die Querkzugfestigkeit der BNC-Verbundwerkstoffe signifikant beeinträchtigen.

Die BNC-Verbundwerkstoffe wiesen eine Wasseraufnahme von 170-200 % auf. Die Wasseraufnahme kann je nach Anwendung in einem Umfeld mit hoher Feuchtigkeit zu problematischer Dickenquellung führen. Allerdings kann man diese hohe Wasseraufnahme als Chance gesehen werden, da sie ein einfaches Recyclingverfahren des Verbundwerkstoffs, durch Deaktivierung der Bindungskräfte der Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Cellulosestrukturen der BNC und der Holzpartikel in Wasser, ermöglicht. Bei dem Recycling können durch die Zugabe von nur 2 Gew.-% BNC die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften nahezu vollständig wiederhergestellt werden. Dadurch wurde das Potenzial von BNC als kreislauffähiges Bindemittel für Holzpartikel bestätigt.

Die Abschätzung der Produktionskosten zeigte, dass die Bindemittelkosten den grössten Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Während BNC-Verbundwerkstoffe bei den Herstellkosten im Vergleich zu Spanplatten zunächst teurer sind (120-250 % der Kosten), könnte durch mehrfaches Recycling und geringen BNC-Zusatz eine Angleichung der Herstellkosten über mehrere Produktlebenszyklen erreicht werden. Hinzu kommt, dass Rohmaterialien wie Nebenprodukte aus Sägewerken oder auch eine effizientere Herstellung der BNC die Materialkosten senken würden.

Die Aufstellung einer Ökobilanz für die Produktion von BNC-Verbundwerkstoffen ergab zunächst ein um etwa 65 % höheres Treibhauspotenzial (THP) als bei Spanplatten (205 kg CO₂eq/m³). Ausschlaggebend war, dass die Herstellung der BNC 80-90 % der Emissionen verursacht (basierend auf den bislang nur abgeschätzten THP-Werten einer BNC-Produktion im Industriemassstab, die unter Umständen deutlich niedriger ausfallen können). Die Recyclingfähigkeit von BNC-Verbundwerkstoffen stellte jedoch einen erheblichen Vorteil dar. Durch die Zugabe von nur 2 Gew.-% BNC während des Recyclingprozesses wurde das THP für 1 m³ BNC-Verbundwerkstoff auf durchschnittlich 224 kg CO₂eq. reduziert, was mit dem von Spanplatten vergleichbar ist. Weitere Recyclingzyklen zeigten sogar ein noch niedrigeres THP, dass im zweiten und dritten Zyklus auf 186 kgCO₂eq. bzw. 167 kg CO₂eq. sank. Dies zeigt, dass BNC-Verbundwerkstoffe durch effizientes Recycling einen wettbewerbsfähiges THP im Vergleich zu herkömmlichen Spanplatten erreichen können.

Die Integration des Verfahrens zur Herstellung von BNC-Verbundwerkstoffen in die Infrastruktur von Sägewerken erscheint grundsätzlich machbar, da dort sowohl die nötigen Rohmaterialien in Form von Sägenebenprodukten, wie Sägespänen, als auch thermische Energie für den Herstellungsprozess verfügbar sind. Dies könnte den Transportaufwand und Energiekosten reduzieren. Für eine Industrialisierung sind jedoch weitere Entwicklungen erforderlich, insbesondere eine Anpassung der Presstechnologie an den Feuchtegehalt der Pressmatten sowie der Aufbau eines wirtschaftlich tragfähigen Recyclingkonzepts.

In den durchgeführten branchenspezifischen Workshops wurde bestätigt, dass der BNC-Verbundwerkstoff ein vielversprechendes Material mit Anwendungspotenzial in verschiedenen Zielbranchen darstellt. Die Kombination aus Schadstofffreiheit, biologischer Abbaubarkeit, Rezyklierbarkeit und vielseitiger Gestaltbarkeit eröffnet Möglichkeiten in verschiedenen Branchen. Gleichzeitig ist der Übergang von der Herstellung von den im Labor entwickelten Verbundwerkstoffen hin zu einer industriellen Fertigung mit technischen, logistischen und wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Entscheiden wird sein, dass die Herstellungsprozesse optimiert werden und skalierbar sind, die Materialeigenschaften gezielt anpassbar sind und eine klare Marktnische besetzt wird, bei der im besten Fall auch das Recycling möglich ist. Die Teilnehmenden der Workshops zeigten sich zuversichtlich, dass sich aus dem BNC-Verbundwerkstoff zukunftsfähige Anwendungen entwickeln lassen. Einige Unternehmen zeigten bereits grosses Interesse an einer weiteren Zusammenarbeit, was eine solide Grundlage für fortführende Projekte bildet.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse das Potenzial von BNC als recyclingfähiges Bindemittel für Verbundwerkstoffe. Dieses BAFU-Projekt liefert eine fundierte Grundlage für zukünftige Entwicklung von Verbundwerkstoffen unter Einsatz von BNC als Bindemittel. Entsprechende Aktivitäten für die Produktentwicklung durch Wirtschaftspartner und die Berner Fachhochschule konnten durch das Projekt erfolgreich initiiert und gestartet werden.

7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Baustoffe und biobasierte Materialein und des Projektverantwortlichen gültig.

7.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 71 Seiten.

8 Verzeichnisse

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von unterschiedlichen Arten von Nanocellulose (Cheng et al. 2022)	10
Tabelle 2: Übersicht und detaillierte Informationen zu den Produktionsparametern und angewandten Variablen	27
Tabelle 3: Ertrag der drei verschiedenen Siebfraktionen nach dem Sieben	32
Tabelle 4: Oberflächen- und Kerndichte von BNC-Verbundwerkstoffen, die mit Waschverfahren gewaschen wurden	35
Tabelle 5: Grober Kostenvergleich der Produktions- und Rohstoffkosten eines möglichen zukünftigen BNC-Verbundwerkstoffs mit einer Spanplatte, basierend auf dem Kostenmodell von Poppensieker (2010)	46
Tabelle 6: Sammlung der potenziellen Anwendungen im ersten Workshop	50
Tabelle 7: Sammlung der potenziellen Anwendungen im zweiten Workshop	52

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gluconacetobacter-Bakterien bei der Bildung von Cellulosefibrillen, die sich zu einem Nanofasernetzwerk verbinden (Klemm, Kramer et al. 2011)	8
Abbildung 2: Holzpartikel a) mit CNF b) beschichtet (Kojima, Kato et al. 2019)	16
Abbildung 3: Holzpartikel mit CNF a) beschichtet mit einem Feststoffgehalt von 3 % (Tayeb et al 2018)	16
Abbildung 4: Kiefernholzpartikel a) unbeschichtet (links) und beschichtet mit CNF b) mit einem Feststoffgehalt von 3 % (Tajvidi et al. 2016)	17
Abbildung 5: Sisalfaser (a), die über Wasserstoffbrückenbindungen mit BNC verbunden ist (b) (Lee, Ho et al. 2012)	17
Abbildung 6: Schematischer Herstellungsprozess von CNF-Verbundwerkstoffen	18
Abbildung 7: Spülen der BNC-Filme mit Wasser	23
Abbildung 8: Homogenisierte BNC	24
Abbildung 9: Schritte zur Herstellung und Recycling von BNC-Verbundwerkstoffen	25
Abbildung 10: BNC-Verbundwerkstoff hergestellt mit dem Heisspressverfahren	31
Abbildung 11: Prüfkörper mit den Partikelgrößen 0-1 mm (oben) und 1-2,8 mm (unten)	38
Abbildung 12: Recycelte BNC-Verbundwerkstoffe ohne zusätzliche BNC (oben) und einer Zugabe von 8 % BNC (unten)	42
Abbildung 13: Lichtmikroskopbild; unverpresste gefärbte Holzpartikel a), die fast vollständig mit einer dünnen BNC-Schicht bedeckt sind, und eine brückenartige BNC-Struktur, die zwischen den Holzpartikeln b) gebildet wird	44
Abbildung 14: Lichtmikroskopbild; komprimierte Holzpartikel a), die fast vollständig mit BNC b) benetzt sind; Blick in die Hohlräume einer Stirnseite eines BNC-Verbundwerkstoffs mit 10 Gew.-% BNC-Gehalt	44
Abbildung 15: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Holzpartikeln a) beschichtet mit BNC b) und Brückenbildung und Agglomeration von BNC zwischen den Partikeln	45
Abbildung 16: Lichtmikroskopbild: BNC-Partikel a) lagern sich in der offenen Holzporenstruktur b) ab	45
Abbildung 17: Gesamter Herstellungsprozess von BNC-Verbundwerkstoffen inklusive Recycling	49

8.3 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Restholzwertung in den Sägereien 2023 (Bundesamt für Statistik 2024)	5
Diagramm 2: Vergleich der Dichte und Querzugfestigkeit von drei Standard-BNC-Verbundwerkstoffen, die unter kontrollierten Variablen (gleiche Pressbedingungen) hergestellt wurden; n=7	32
Diagramm 3: Einfluss von sechs verschiedenen Waschverfahren der als Bindemittel verwendeten BNC auf die Querzugfestigkeit der Prüfkörper, hergestellt mit 10 Gew.-% BNC-Gehalt; n=5-12	33
Diagramm 4: Biegesteifigkeit BNC-Verbundwerkstoffen bei Einsatz von BNC aus unterschiedlichen Waschprozessen; n=1	34
Diagramm 5: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 2 und 3), die für die Herstellung des Verbundwerkstoffs verwendet wurden, auf die Querzugfestigkeit der Prüfkörper; n=6	34
Diagramm 6: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 1), die für die Verbundwerkstoffherstellung verwendet wurden, auf die Querzugfestigkeit der Prüfkörper; n=7	35
Diagramm 7: Einfluss verschiedener BNC-Gehalte (10 Gew.-%, 15 Gew.-% und 20 Gew.-%, gewaschen mit Ansatz 2 (0,4 % NaOH 90 °C 90 min) und 3 (3 % NaOH 20 °C 90 min)) auf die Biegefestigkeit der Prüfkörper; n=1	36
Diagramm 8: Einfluss verschiedener Dichten der Verbundwerkstoffe auf die Querzugfestigkeit der Prüfkörper, dargestellt als leicht logarithmische Kurve; n=22	36
Diagramm 9: Einfluss verschiedener Dichten des Verbundwerkstoffs auf die Biegesteifigkeit; n=1	37
Diagramm 10: Einfluss der Partikelgröße in dem Verbundwerkstoff auf die Querzugfestigkeit; n=5-8	38
Diagramm 11: Einfluss des Feuchtegehalt der Pressmatte auf die Querzugfestigkeit der Verbundwerkstoffe; n=5-8	39
Diagramm 12: Querzugfestigkeit von verschiedenen BNC-Verbundwerkstoffen, mit unterschiedlichen Dicken und Dichten; n=4-7	40
Diagramm 13: Dickenquellung von BNC-Verbundwerkstoffen hergestellt mit unterschiedlichen Produktions- und Materialparametern; n=4	41
Diagramm 14: Querzugfestigkeiten von recycelten Verbundwerkstoffen mit unterschiedlicher Zugabe von BNC; n=8	42
Diagramm 15: Querzugfestigkeiten von mehrfach recycelten BNC-Verbundwerkstoffen; n=8	43
Diagramm 16: Biegesteifigkeit von recycelten Verbundwerkstoffen mit unterschiedlichen Zugaben von BNC; n=1	43
Diagramm 17: Biegesteifigkeiten von mehrfach recycelten BNC-Verbundwerkstoffen; n=4	44
Diagramm 18: Vergleich des THP zur Herstellung von 1 m ³ Spanplatten für Innenanwendungen mit zwei Ansätzen für die Herstellung von 1 m ³ BNC-Verbundwerkstoff und drei Recyclingzyklen	48

8.4 Literaturverzeichnis

Amini, Ezatollah, Mehdi Tajvidi, Douglas Jerome Gardner and Douglas Wayne Bousfield (2017). Cellulose nanofibril particleboard. Tech. rep. 2.

Araújo e Silva, Renata de, Ana Iraidy Santa Brígida, Morsyleide de Freitas Rosa, Raimundo Marcelino da Silva Neto, Wilma Aparecida Spinosa, Ednaldo Benécio de Sá Filho and Maria Cléa Brito de Figueirêdo (Oct. 2020). "An approach for implementing ecodesign at early research stage: A case study of bacterial cellulose production". In: *Journal of Cleaner Production* 269.

Arunan, Elangannan, Gautam R. Desiraju, Roger A. Klein, Joanna Sadlej, Steve Scheiner, Ibon Alkorta, David C. Clary, Robert H. Crabtree, Joseph J. Dannenber, Pavel Hobza, Henrik G. Kjaergaard, Anthony C. Legon, Benedetta Mennucci and David J. Nesbitt (2011). "Definition of the hydrogen bond (IUPAC Recommendations 2011)". In: *Pure and Applied Chemistry* 83.8, pp. 1637–1641.

Azzam, Firas, Laurent Heux, Jean-Luc Putaux and Bruno Jean (Dec. 2010). "Preparation By Grafting Onto, Characterization, and Properties of Thermally Responsive Polymer-Decorated Cellulose Nanocrystals". In: *Biomacromolecules* 11.12, pp. 3652–3659.

Beck-Candanedo, Stephanie, Maren Roman and Derek G. Gray (Mar. 2005). "Effect of Reaction Conditions on the Properties and Behavior of Wood Cellulose Nanocrystal Suspensions". In: *Biomacromolecules* 6.2, pp. 1048–1054.

Bondeson, Daniel, Aji Mathew and Kristiina Oksman (Apr. 2006). "Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis". In: *Cellulose* 13.2, pp. 171–180.

Bundesamt für Statistik 2023 Bundesamt für Statistik (Juli 2024). Holzverarbeitung in Schweizer Sägereien, 2023.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2022). Jahrbuch Wald und Holz 2022. Tech. rep. Bern.

Cheng, Zheng, Jinpeng Li, Bin Wang, Jinsong Zeng, Jun Xu, Shiyun Zhu, Chengliang Duan and Kefu Chen (Sept. 2022). "Comparative study on properties of nanocellulose derived from sustainable biomass resources". In: *Cellulose* 29.13, pp. 7083–7098.

Chisuzu, Tokoh Ā, Keiji Takabe, Minoru Fujita and Hiroshi Saiki (1998). Cellulose synthesized by *Acetobacter xylinum* in the presence of acetyl glucomannan. Tech. rep.

Cowie, N, Ted Bilek, Theodore H Wegner and E Shatkin (2014). Market projections of cellulose nanomaterial-enabled products- Part 2: Volume estimates. Tech. rep.

Ding, Qijun, Jinsong Zeng, Bin Wang, Darong Tang, Kefu Chen and Wenhua Gao (Mar. 2019). "Effect of nanocellulose fiber hornification on water fraction characteristics and hydroxyl accessibility during dehydration". In: *Carbohydrate Polymers* 207, pp. 44–51.

Dong, Xue Min, Tsunehisa Kimura, Jean-François Revol and Derek G. Gray (Jan. 1996). "Effects of Ionic Strength on the Isotropic Chiral Nematic Phase Transition of Suspensions of Cellulose Crystallites". In: *Langmuir* 12.8, pp. 2076–2082.

Eero Sjöström (1993). Wood Chemistry. Tech. rep.

Eriksson, Malin, Shannon M. Notley and Lars Wågberg (Mar. 2007). "Cellulose Thin Films: Degree of Cellulose Ordering and Its Influence on Adhesion". In: *Biomacromolecules* 8.3, pp. 912–919.

Fernandes Diniz, J. M.B., M. H. Gil and J. A.A.M. Castro (Apr. 2004). "Hornification - Its origin and interpretation in wood pulps". In: *Wood Science and Technology* 37.6, pp. 489–494.

Fornué, E D, G G Allan, H J C Quiñones, G T González and J T Saucedo (Sept. 2011). "Fundamental aspects of adhesion between cellulosic surfaces in contact - A review". In: O Papel 72, pp. 85–90.

Forte, Ana, Fernando Dourado, André Mota, Belmira Neto, Miguel Gama and Eugénio Campos Ferreira (May 2021). "Life cycle assessment of bacterial cellulose production". In: International Journal of Life Cycle Assessment 26.5, pp. 864–878.

Garcia de Rodriguez et al. 2006; Garcia de Rodriguez, Nancy Lis, Wim Thielemans and Alain Dufresne (2006). "Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites". In: Cellulose 13.3, pp. 261–270.

Gardner, Douglas, Gloria S. Oporto, Ryan Mills and My Ahmed Said Azizi Samir (Jan. 2008). Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. Tech. rep. 5-6, pp. 545–567.

Gilli, Gastone and Paola Gilli (June 2009). The Nature of the Hydrogen Bond. Oxford University Press.

Guhados, Ganesh, Wankei Wan and Jeffrey L. Hutter (July 2005). "Measurement of the Elastic Modulus of Single Bacterial Cellulose Fibers Using Atomic Force Microscopy". In: Langmuir 21.14, pp. 6642–6646.

Habibi, Youssef, Henri Chanzy and Michel R. Vignon (Dec. 2006). TEMPO-mediated surface oxidation of cellulose whiskers. Tech. rep. 6, pp. 679–687.

Habibi, Youssef, Lucian A. Lucia and Orlando J. Rojas (June 2010). "Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications". In: Chemical Reviews 110.6, pp. 3479–3500.

Hafez, Islam and Mehdi Tajvidi (Mar. 2020). Laminated wallboard panels made with cellulose nanofibrils as a binder: Production and properties. Tech. rep. 6.

Han, Juyeon, Euijin Shim and Hye Rim Kim (Mar. 2019). "Effects of cultivation, washing, and bleaching conditions on bacterial cellulose fabric production". In: Textile Research Journal 89.6, pp. 1094–1104.

Henriksson, M., G. Henriksson, L. A. Berglund and T. Lindström (Aug. 2007). "An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers". In: European Polymer Journal 43.8, pp. 3434–3441.

Hoeng, Fanny, Aurore Denneulin and Julien Bras (July 2016). Use of nanocellulose in printed electronics: A review.

Hubbe, Martin (Nov. 2006). "Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry-strength agents – A review". In: BioResources 1.2, pp. 281–318.

Hussain, Zohaib, Wasim Sajjad, Taous Khan and Fazli Wahid (Mar. 2019). Production of bacterial cellulose from industrial wastes: a review.

ISO/TS 229 2017). ISO/ TS 229 (Aug. 2017). ISO/TS 20477:2017(en).

Jang, Woo Dae, Ji Hyeon Hwang, Hyun Uk Kim, Jae Yong Ryu and Sang Yup Lee (Sept. 2017). Bacterial cellulose as an example product for sustainable production and consumption.

Joseleau, Jean Paul, Valérie Chevalier-Billosta and Katia Ruel (June 2012). "Interaction between microfibrillar cellulose fines and fibers: Influence on pulp qualities and paper sheet properties". In: Cellulose 19.3, pp. 769–777.

Juntaro, Julasak, Marion Pommet, Athanasios Mantalaris, Milo Shaffer and Alexander Bismarck (Sept. 2007). "Nanocellulose enhanced interfaces in truly green unidirectional fibre reinforced composites". In: Composite Interfaces 14.7-9, pp. 753–762.

Kadimaliev, Davud, Elena Kezina, Vladimir Telyatnik, Victor Revin, Olga Parchaykina and Ilya Syusin (2015). Wood binder with yeast. Tech. rep. 1, pp. 1644–1656.

Kalia, Susheel, Alain Dufresne, Bibin Mathew Cherian, B. S. Kaith, Luc Avérous, James Njuguna and Elias Nassiopoulou (2011). Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review.

Karl Fronius (1982). Arbeiten und Anlagen im Sägewerk. Stuttgart: DRW-Verlag Weinbrenner-KG.

Kennedy, J. F. and J. Shimizu (May 1995). "Cellulosic polymers—blends and composites, edited by R. D. Gilbert. Hanser Publishers, Munich, 1994. pp. xii + 244, ISBN 3-446- 16521-5". In: Polymer International 37.1, pp. 84–84.

Kiel, Alina ; and Kiel, Ulrich (2023). Standard-Nutzungsbedingungen. Tech. rep.

Klemm, Dieter, Brigitte Heublein, Hans-Peter Fink and Andreas Bohn (May 2005). "Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material". In: Angewandte Chemie International Edition 44.22, pp. 3358–3393.

Klemm, Dieter, Dieter Schumann, Ulrike Udhardt and Silvia March (2001). Bacterial synthesized cellulose artificial blood vessels for microsurgery. Tech. rep., pp. 1561–1603.

Klemm, Dieter, Friederike Kramer, Sebastian Moritz, Tom Lindström, Mikael Ankerfors, Derek Gray and Annie Dorris (June 2011). "Nanocellulosen: eine neue Familie naturbasierter Materialien". In: Angewandte Chemie 123.24, pp. 5550–5580.

Kloser, Elisabeth and Derek G. Gray (Aug. 2010). "Surface Grafting of Cellulose Nanocrystals with Poly(ethylene oxide) in Aqueous Media". In: Langmuir 26.16, pp. 13450–13456.

Kojima, Yoichi, Akiko Isa, Hikaru Kobori, Shigehiko Suzuki, Hirokazu Ito, Rie Makise and Masaki Okamoto (2014). "Evaluation of binding effects in wood flour board containing ligno-cellulose nanofibers". In: 6.9, pp. 6853–6864.

Kojima, Yoichi, Atsushi Ishino, Hikaru Kobori, Shigehiko Suzuki, Hirokazu Ito, Rie Makise, Itsuro Higuchi and Masaki Okamoto (Oct. 2015). "Reinforcement of wood flour board containing ligno-cellulose nanofiber made from recycled wood". In: Journal of Wood Science 61.5, pp. 492–499.

Kojima, Yoichi, Naho Kato, Kazuaki Ota, Hikaru Kobori, Shigehiko Suzuki, Kenji Aoki and Hirokazu Ito (2019). Cellulose nanofiber as complete natural binder for particleboard. Tech. rep. 3, pp. 203–210.

Lee, Koon Yang, Kingsley K.C. Ho, Kerstin Schlufte and Alexander Bismarck (Aug. 2012). "Hierarchical composites reinforced with robust short sisal fibre preforms utilising bacterial cellulose as binder". In: Composites Science and Technology 72.13, pp. 1479–148.

Lee, Koon Yang, Siti Rosminah Shamsuddin, Marta Fortea-Verdejo and Alexander Bismarck (May 2014). "Manufacturing of robust natural fiber preforms utilizing bacterial cellulose as binder". In: Journal of Visualized Experiments 87.

Leng, Weiqi, John F Hunt and Mehdi Tajvidi (2017). Bending of wet-form particleboard. Tech. rep. 3.

Mateo, José Juan and Sergi Maicas (July 2015). "Valorization of winery and oil mill wastes by microbial technologies". In: Food Research International 73, pp. 13–25.

Mohammadkazemi et al. (2015) Mohammadkazemi, Faranak, Kazem Doosthoseini, Eshmaiel Ganjian and Mehrdad Azin (Dec. 2015). "Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber-cement composites". In: Construction and Building Materials 101, pp. 958–964.

Moon, Robert J., Ashlie Martini, John Nairn, John Simonsen and Jeff Youngblood (June 2011). "Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites". In: Chemical Society Reviews 40.7, pp. 3941–3994.

Nakagaito, A. N., S. Iwamoto and H. Yano (Jan. 2005). "Bacterial cellulose: The ultimate nano-scalar cellulose morphology for the production of high-strength composites". In: *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 80.1, pp. 93-97.

Nasir, Muhammad, Muhammad Arif Aziz, Mukarram Zubair, Mohammad Saood Manzar, Noman Ashraf, Nuhu Dalhat Mu'azu and Mamdouh A. Al-Harhi (Apr. 2022). Recent review on synthesis, evaluation, and SWOT analysis of nanostructured cellulose in construction applications.

Nishi, Y, M Uryu, S Yamanaka, K Watanabe, N Kitamura, M Iguchi and S Mitsuhashi (1990). The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose Part 2 Improvement of the mechanical properties of sheets and their applicability to diaphragms of electroacoustic transducers. *Tech. rep.*, pp. 2997-3001.

Peng, Yucheng, Douglas J. Gardner and Yousoo Han (Feb. 2012). "Drying cellulose nanofibrils: In search of a suitable method". In: *Cellulose* 19.1, pp. 91-102.

Pizzi, A. and N. Eaton (Jan. 1985). "The Structure of Cellulose by Conformational Analysis. 2. The Cellulose Polymer Chain". In: *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry* 22.1, pp. 105-137.

Poppensieker, Timm Hermann (2010). "Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von leichten Holzwerkstoffen". PhD thesis.

Putra, Ananda, Akira Kakuco, Hidemitsu Furukawa and Jian Ping Gong (2009). "Orientated bacterial cellulose culture controlled by liquid substrate of silicone oil with different viscosity and thickness". In: *Polymer Journal* 41.9, pp. 764-770.

Rainer, Jonas and Luiz F. Farah (1998). Production and application of microbial cellulose. *Tech. rep.*, pp. 101-106.

Randhawa, Aayushi, Sayan Deb Dutta, Keya Ganguly, Tejal V. Patil, Dinesh K. Patel and Ki Taek Lim (July 2022). A Review of Properties of Nanocellulose, Its Synthesis, and Potential in Biomedical Applications.

Reising, Alexander B., Robert J. Moon and Jeffery P. Youngblood (2012). Effect of particle alignment on mechanical properties of neat cellulose nanocrystal films. *Tech. rep.*

Rozenberga, Linda, Marite Skute, Lubova Belkova, Inese Sable, Laura Vikele, Pavels Semjonovs, Madara Saka, Maija Ruklisha and Longina Paegle (June 2016). "Characterisation of films and nanopaper obtained from cellulose synthesised by acetic acid bacteria". In: *Carbohydrate Polymers* 144, pp. 33-40.

Saito, Tsuguyuki, Yoshiharu Nishiyama, Jean-Luc Putaux, Michel Vignon and Akira Isogai (June 2006). "Homogeneous Suspensions of Individualized Microfibrils from TEMPO-Catalyzed Oxidation of Native Cellulose". In: *Biomacromolecules* 7.6, pp. 1687-1691.

Salmon, Sonja and Samuel M. Hudson (1997). "Crystal morphology, biosynthesis, and physical assembly of cellulose, chitin, and chitosan". In: *Journal of Macromolecular Science - Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics* 37.2, pp. 199-276.

Schweizer Norm EN 312:2010 (2010). EN 312 Spanplatten Anforderungen. Zürich.

Schweizer Norm EN 319 (1993). EN 319 Spanplatten und Faserplatten - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene.

Suisse, Norme and Norma Svizzera (1993). Normenbereich Bauwesen Schweizer Norm §N Sia Norm Spanplatten und Faserplatten-Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung. *Tech. rep.*

Tajvidi, Mehdi, Douglas J. Gardner and Douglas W. Bousfield (Oct. 2016). Cellulose nanomaterials as binders: Laminate and particulate systems.

Tayeb, Ali H., Ezatollah Amini, Shokoofeh Ghasemi and Mehdi Tajvidi (Oct. 2018). Cellulose nanomaterials-binding properties and applications: A review.

Wang, Jing, Javad Tavakoli and Youhong Tang (Sept. 2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods - A review. Tech. rep., pp. 63-76.

Wang, Sha, Tian Li, Chaoji Chen, Weiqing Kong, Shuze Zhu, Jiaqi Dai, Alfredo J. Diaz, Emily Hitz, Santiago D. Solares, Teng Li and Liangbing Hu (June 2018). Transparent, Anisotropic Biofilm with Aligned Bacterial Cellulose Nanofibers. Tech. rep. 24.

Watanabe Ā, Kunihiko, Mari Tabuchi, Yasushi Morinaga and Fumihiro Yoshinaga (1997). Structural features and properties of bacterial cellulose produced in agitated culture. Tech. rep.

Yamanaka, S, K Watanabe, N Kitamura, M Iguchi, S Mitsuhashi, Y Nishi and M Uryu (1989). The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose. Tech. rep., p. 3145.

Yue, Fang, Shi Xianrui, Wang Xiang, Li Zhaoquian, Shen Jinpeng and Pei Chonghua (Oct. 2022). ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022 Composition Regulation of free Delignification of wood powder toward high performance, recyclable composites. Tech. rep., pp. 15999-16008.

Zhong, Chunyan (Dec. 2020). Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose.
