

Fahrerlose Transportfahrzeuge in Holzbauweise – Entwicklung eines modularen Leichtbaukonzepts

**Max Geistert,
Sven Eichhorn,
Markus Golder,**

*Professur Förder- und Materialflusstechnik
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Technische Universität Chemnitz*

Im Rahmen des Verbundprojekts "WVC-FTF" werden fahrerlose Transportfahrzeuge in Holzleichtbauweise entwickelt und hinsichtlich ihrer technischen Eignung für intralogistische Anwendungen untersucht. Ziel ist die Substitution konventioneller Metallstrukturen durch modulare Holzbauweisen, um das Fahrzeuggewicht zu reduzieren und gleichzeitig Skalierbarkeit, Energieeffizienz sowie Ressourcenschonung zu verbessern. Hierzu wurden ein Unterfahr-FTF und ein Montagewagen in Holzbauweise entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurde ein crashabsorbierendes Funktionselement aus einem strukturgeschwächten Holzbauteil in eines der Fahrzeuge integriert. Dieses lässt sich mittels Kerf Bending[®] verformen und wird somit zur Energieabsorption genutzt. Die Demonstratoren werden derzeit umfangreichen Fahr- und Belastungstests unterzogen. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die grundsätzliche technische Machbarkeit der Holzbauweise. Zudem konnten eine Gewichtsreduzierung sowie ein verringerter Energiebedarf gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug in Stahlbauweise nachgewiesen werden.

[Schlüsselwörter: Fahrerloses Transportsystem, Intralogistik, Holzwerkstoff, Leichtbauweise, Kerf Bending]

1 EINLEITUNG

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) haben sich zu einer Schlüsseltechnologie der Intralogistik entwickelt. Sie ermöglichen die automatisierte Beförderung von Gütern in Produktions- und Lagerumgebungen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung moderner Industriekonzepte. Durch die stetige Weiterentwicklung der Systeme steigt deren Leistungsfähigkeit kontinuierlich an.

Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an Energieeffizienz, Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit.

Die konstruktive Ausführung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) erfolgt nahezu ausschließlich unter Verwendung metallischer Werkstoffe. Insbesondere Stahl- und Aluminiumlegierungen kommen für die tragenden Fahrzeugstrukturen, Schutzeinrichtungen und Anbauteile zum Einsatz. Diese Werkstoffe verfügen zwar über die entsprechenden mechanischen Eigenschaften, gehen jedoch mit einem vergleichsweise hohen Eigengewicht sowie einem hohen Energie- und Ressourcenbedarf in der Herstellung einher. Das hohe Fahrzeuggewicht wirkt sich unmittelbar auf die Antriebsleistung, den Energieverbrauch sowie die Belastung der Fahrwerks- und Steuerungskomponenten aus.

Vor diesem Hintergrund rücken alternative Werkstoffe zunehmend in den Fokus. Holzwerkstoffe zeichnen sich durch ein günstiges Verhältnis von Festigkeit und Dichte aus und bieten darüber hinaus ökologische Vorteile. Trotzdem sind bislang keine kommerziell verfügbaren FTF bekannt, deren tragende Struktur vorwiegend aus Holzwerkstoffen besteht.

Im Rahmen des Verbundprojekts WVC-FTF[®] wird deshalb untersucht, inwieweit sich Holzwerkstoffe für die Umsetzung solcher Fahrzeuge eignen. Gemeinsam mit der Beldrive Engineering GmbH und der Ligenium GmbH entwickelt die Professur Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz unterschiedliche Fahrzeugkonzepte in Holzleichtbauweise. Neben der Substitution metallischer Strukturen stehen insbesondere die Entwicklung eines modularen Baukastensystems sowie die Umsetzung eines stoßabsorbierenden Funktionselements auf Basis nachwachsender Werkstoffe im Fokus.

Der Beitrag stellt die bislang erzielten Ergebnisse des laufenden Forschungsvorhabens vor und beschreibt

die Entwicklung, Fertigung und Erprobung zweier unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte in Holzleichtbauweise.

2 ZIELSTELLUNG

Ziel des Projekts WVC-FTF⁴ ist die Entwicklung und Umsetzung von fahrerlosen Transportfahrzeugen in Holzleichtbauweise sowie die Untersuchung ihrer technischen, ökonomischen und ökologischen Potenziale. Die konventionell eingesetzten Metallwerkstoffe sollen weitestmöglich durch WVC (Wood Veneer Composite, dt.: Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe) ersetzt werden, ohne die Funktionalität, Sicherheit und Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge zu beeinträchtigen. Eigenschaften wie Traglast, Adaptierbarkeit und Energieeffizienz sollen dadurch sogar gesteigert werden.

Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines modularen Baukastensystems, das die Umsetzung unterschiedlicher Fahrzeugtypen auf Grundlage bestimmter Konstruktionsprinzipien ermöglicht. Die Fahrzeugstrukturen sollen so ausgelegt werden, dass sie sich auf verschiedene Baugrößen und Einsatzbereiche übertragen lassen. Hierdurch sollen Entwicklungs- und Fertigungsaufwand reduziert sowie zukünftige Anpassungen vereinfacht werden.

In die hölzerne Fahrzeugstruktur wird ein crashabsorbierendes Funktionselement integriert. Dieses wird ausschließlich auf Basis nachhaltiger Werkstoffe umgesetzt, wodurch weitere Elemente aus metallischen oder polymeren Werkstoffen substituiert werden sollen. Die bei einer Kollision auftretende Energie soll durch die Crashabsorber aufgenommen werden, ohne die tragende Fahrzeugstruktur zu beschädigen. Die Energieabsorption erfolgt dabei durch gezielt geschwächte Strukturabschnitte innerhalb der Holzbauteile, die als sogenannte Festkörpergelenke wirken.

Zur Prüfung und Bewertung der entwickelten Konzepte sollen verschiedene Demonstratoren gefertigt und unter realitätsnahen Bedingungen getestet werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird der Fokus auf ein flaches Unterfah-FTF und einen automatisierten Montagewagen gelegt. Die Anwendungstests dienen insbesondere der Erprobung der Tragfähigkeit, der Dauergebrauchseigenschaften sowie der Energieeffizienz der Fahrzeuge. Damit soll die praktische Umsetzbarkeit der Holzbauweise nachgewiesen werden.

3 METHODIK

Die Entwicklung der Fahrzeugkonzepte erfolgt im Rahmen eines Verbundprojekts zwischen der Beldrive Engineering GmbH, der Ligenium GmbH sowie der Professur Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Die Beldrive Engineering GmbH ist

erfahrener Hersteller im Bereich Automatisierungstechnik und autonomer Fahrzeuge. Die Ligenium GmbH bringt Expertise im Bereich Holzwerkstoffe und Holzbauweisen ein.

Zu Beginn des Projekts wurden bestehende metallische Fahrzeugstrukturen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Umsetzung in Holzbauweise untersucht. Als Ergebnis wurden zwei Fahrzeugtypen ausgewählt, die aufgrund ihrer verschiedenen Einsatzzwecke unterschiedliche konstruktive Anforderungen repräsentieren. Dabei handelt es sich zum einen um ein flaches Unterfah-FTF, das insbesondere für den Transport von Ladungsträgern und Paletten vorgesehen ist. Zum anderen wurde ein höherer Montagewagen ausgewählt, der zur Bereitstellung und für den Transport von Baugruppen innerhalb von Montage- und Produktionsprozessen dient.

Auf Grundlage der spezifischen Anforderungen und Einschränkungen hinsichtlich Fahrzeugtechnik und Holzbauweise wurden die Fahrzeugstrukturen zunächst als CAD-Modelle entwickelt. Parallel dazu erfolgte die Auswahl und Anpassung der erforderlichen Fahrzeugtechnik. Besondere Aufmerksamkeit galt der Integration der Antriebs- und Steuerungskomponenten in die Holzstruktur sowie der konstruktiven Gestaltung der Verbindungen zwischen den einzelnen Fahrzeugmodulen.

Im Anschluss an die konstruktive Ausarbeitung wurden die Holzstrukturen mittels CNC-Bearbeitung gefertigt und zu Funktionsmustern zusammengebaut. Danach erfolgte die Integration der Fahrzeugtechnik sowie die Inbetriebnahme der Demonstratoren. Die entwickelten Fahrzeuge werden seitdem umfangreichen Funktions-, Fahr- und Belastungstests unterzogen.

Zeitgleich zur Entwicklung der Tragstrukturen wurden unterschiedliche Konzepte für einen Crashabsorber auf Basis von Holzwerkstoffen untersucht. Dabei kamen strukturgeschwächte Bauteile zum Einsatz, die durch gezielte Schlitzungen (Kerf Bending⁵) definierte Verformungen ermöglichen und dadurch Stoßenergie aufnehmen können.

4 UMSETZUNG

4.1 ENTWICKLUNG DES UNTERFAHR-FTF

Den Schwerpunkt der bisherigen Entwicklungsarbeiten bildet ein Unterfah-FTF in Holzleichtbauweise. Dieser Fahrzeugtyp wurde ausgewählt, da er aufgrund seiner kompakten Bauweise besonders hohe Anforderungen an die Konstruktion stellt. Gleichzeitig repräsentiert er einen weit verbreiteten Fahrzeugtyp innerhalb moderner Intralogistiksysteme und eignet sich daher besonders gut zur Untersuchung der Potenziale nachhaltiger Werkstoffe im Bereich fahrerloser Transportfahrzeuge.

Abbildung 1 zeigt das entwickelte Fahrzeug bei der Beldrive Engineering GmbH. Es soll später insbesondere der Aufnahme und dem Transport von auf Paletten gelagerten Gütern dienen. Die Struktur ist als flache Plattform ausgeführt, sodass das Fahrzeug unter Lastaufnahmemitteln fahren und diese anheben beziehungsweise transportieren kann. Die geringe Bauhöhe führt dazu, dass sämtliche Fahrzeugkomponenten auf engem Bauraum angeordnet werden müssen. Dies betrifft die Antriebseinheiten, die Steuerungstechnik, die Sensorik sowie die Energieversorgung.



Abbildung 1: Unterfahr-FTF in Holzbauweise

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen, deren tragende Struktur überwiegend aus geschweißten Stahlbaugruppen besteht, basiert das entwickelte Unterfahr-FTF auf einer modularen Holzrahmenkonstruktion. Die tragenden Komponenten wurden aus plattenförmigen Holzwerkstoffen gefertigt und über formschlüssige Holzverbindungen (Verzapfungen) zu einer lasttragenden Gesamtstruktur zusammengefügt. Dabei wurde besonderer Wert auf einen lastpfadgerechten Kraftfluss gelegt. Ziel war es, die auftretenden Belastungen möglichst direkt in die Holzstruktur ein- und schließlich über die Antriebs- und Lenkrollen abzuleiten.

Eine besondere Herausforderung stellte die Integration der bestehenden Fahrzeugtechnik dar. Während sich in Stahlkonstruktionen zusätzliche Halterungen, Konsolen oder Schweißbaugruppen vergleichsweise einfach ergänzen lassen, müssen entsprechende Befestigungsmöglichkeiten bei Holzstrukturen bereits während der konstruktiven Auslegung berücksichtigt werden. Deshalb wurden Befestigungs-, Führungs- und Montageelemente in die Konstruktion integriert und die Holzstruktur gezielt an die Anforderungen der Fahrzeugtechnik angepasst.

Neben den statischen Anforderungen spielte auch das dynamische Verhalten des Fahrzeugs eine wichtige Rolle. Während konventionelle Fahrzeugkonzepte häufig auf zusätzliche mechanische Elemente zum Ausgleich von

Bodenunebenheiten zurückgreifen, sollte im Projekt untersucht werden, inwieweit die Materialeigenschaften der Holzstruktur selbst zur Erfüllung dieser Funktion genutzt werden können. Die geringere Steifigkeit der Holzstruktur gegenüber einer vergleichbaren Stahlkonstruktion wurde deshalb nicht als Einschränkung betrachtet, sondern gezielt als technischer Vorteil genutzt.

Im Verlauf der Entwicklungsarbeiten wurde das Unterfahr-FTF kontinuierlich weiterentwickelt. Die erste Fahrzeuggeneration diente primär dem Nachweis der grundsätzlichen technischen Machbarkeit. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den ersten Belastungs- und Fahrversuchen wurde anschließend eine zweite Fahrzeuggeneration entwickelt und umgesetzt. Dabei wurden verschiedene konstruktive Details überarbeitet, die Integration einzelner Komponenten optimiert sowie die Gesamtstruktur weiter verbessert.

Die Umsetzung einer zweiten Fahrzeuggeneration ermöglichte es, die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in die Konstruktion einfließen zu lassen und die Eignung der Holzbauweise unter realitätsnahen Bedingungen schrittweise zu validieren.

4.2 ENTWICKLUNG DES MONTAGEWAGENS

Neben dem Unterfahr-FTF wurde ein zweiter Fahrzeugtyp in Holzleichtbauweise realisiert (Abbildung 2). Hierbei handelt es sich um einen Montagewagen, der insbesondere für die Bereitstellung und den Transport von größeren Baugruppen innerhalb von Produktions- und Montagebereichen vorgesehen ist.

Der Montagewagen unterscheidet sich in mehreren Punkten grundlegend vom Unterfahr-FTF. Während bei dem flachen Fahrzeug die Anforderung an eine möglichst kompakte Bauweise im Vordergrund steht, besitzt der Montagewagen eine deutlich größere Fahrzeugstruktur und muss grundlegend anders aufgebaut werden. Darüber hinaus ist das Prinzip zur Lenkung der Fahrzeuge grundsätzlich verschieden. Bei dem Unterfahr-FTF sind die beiden Antriebsrollen mittig angeordnet und können somit einzeln zur Richtungsänderung des gesamten Fahrzeugs angesteuert werden. Der Antrieb des Montagewagens sitzt hingegen frontseitig im sogenannten Triebkopf. Dieser soll wiederum unabhängig von der Montageplattform rotieren können, was einen Aufbau des Fahrzeugs aus mehreren Modulen erfordert. Daraus ergeben sich andere konstruktive Randbedingungen hinsichtlich der Bauweise, Lastverteilung und Integration der Fahrzeugtechnik.

Für den Montagewagen wurde eine Tragstruktur in Holzplattenbauweise in Kombination mit einem profilartigen Tragrahmen entwickelt. Die Konstruktion besteht aus drei Modulen mit mehreren miteinander verbundenen Holzprofilen und Plattenbauteilen, welche gemeinsam die

tragende Fahrzeugstruktur bilden. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine hohe Gestaltungsfreiheit hinsichtlich der Fahrzeugabmessungen sowie der Positionierung der elektronischen Komponenten.

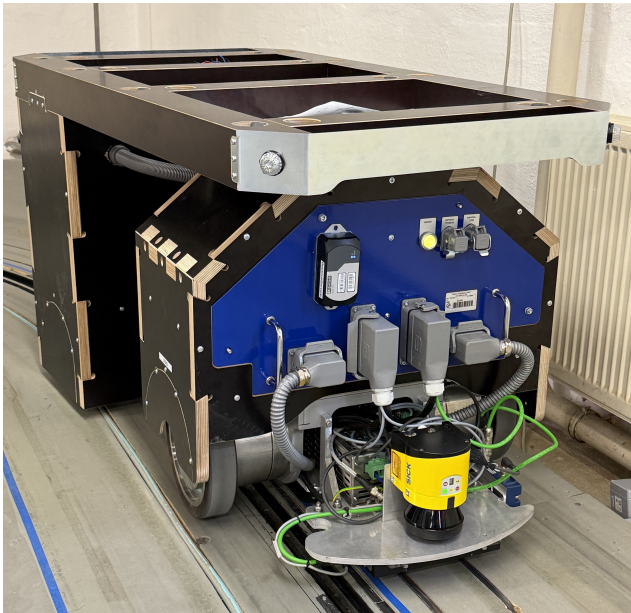


Abbildung 2: Automatisierter Montagewagen in Holzbauweise

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt lag auf der Verbindung des sogenannten Triebkopfs mit dem oberen Tragrahmen. Der Triebkopf beinhaltet die zentrale Antriebseinheit des Fahrzeugs und muss zum Tragrahmen schwenkbar gelagert werden. In konventionellen Fahrzeugen wird diese Funktion üblicherweise durch großdimensionierte Drehkränze oder vergleichbare metallische Lagerlösungen realisiert. Für die Holzbauweise mussten alternative Lösungsansätze entwickelt werden. Ziel war es, eine ausreichend tragfähige und gleichzeitig wirtschaftlich sowie technisch gut umsetzbare Lagerung zu schaffen. Hierzu wurden unterschiedliche Konzepte betrachtet und hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Fertigungsaufwand und Integrationsfähigkeit bewertet.

Parallel zur Entwicklung der Holzstruktur wurde die Fahrzeugtechnik angepasst. Aufgrund der gegenüber Metallkonstruktionen veränderten Randbedingungen mussten verschiedene Komponenten hinsichtlich ihrer Anordnung und Befestigung überarbeitet werden. Dabei zeigte sich insbesondere die frühzeitige Abstimmung zwischen Fahrzeugtechnik und Holzkonstruktion als entscheidender Erfolgsfaktor.

Nach Abschluss der Konstruktionsphase wurde ein erster Demonstrator gefertigt und in Betrieb genommen. Die anschließenden Fahrversuche bestätigten die grundsätzliche

Eignung des gewählten Konzepts. Gleichzeitig konnten weitere Optimierungspotenziale identifiziert werden, die derzeit in eine zweite Fahrzeuggeneration einfließen.

Der Montagewagen dient somit nicht nur als eigenständiger Demonstrator, sondern gleichzeitig als Versuchsträger zur Erprobung alternativer Bauweisen und Lösungsansätze für größere fahrerlose Transportfahrzeuge.

4.3 MODULARER AUFBAU DER FAHRZEUGE

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Umsetzung eines modularen Baukastensystems für die fahrerlosen Transportfahrzeuge in Holzleichtbauweise. Im Gegensatz zu einer anwendungsspezifischen Entwicklung sollte dadurch eine möglichst breite Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Fahrzeuggrößen und Einsatzbereiche ermöglicht werden. Dies sollte eine hohe Flexibilität hinsichtlich zukünftiger Fahrzeugvarianten bzw. Weiterentwicklungen schaffen. Gleichzeitig sollte der konstruktive Entwicklungsaufwand durch die Wiederverwendung bewährter Bauweisen und Konstruktionsprinzipien reduziert werden. Darüber hinaus sollte die Modularität die Wartung und Reparatur der Fahrzeuge erleichtern [1].



Abbildung 3: Montage des Holzfahrzeugs

Die entwickelten Fahrzeugkonzepte basieren daher auf einer gemeinsamen konstruktiven Grundidee. Tragende Strukturen werden durch formschlüssig miteinander verbundene Holzplattenbauteile oder Profile entsprechender Dimensionen (Plattendicke bzw. Wandstärke) aufgebaut und durch mechanische Verbindungen (Holzschrauben zur

Lagefixierung) unterstützt. Die Fertigstellung erfolgt schnell und unkompliziert durch CNC-Fräsen. Somit können Bauteile und Baugruppen einfach angepasst und auf unterschiedliche Fahrzeugtypen übertragen werden. Die Montage wird händisch durch zusammenstecken und verschrauben realisiert (Abbildung 3).

Besonders deutlich wird dies beim Vergleich des Unterfahr-FTF mit dem Montagewagen. Obwohl beide Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Geometrie, ihrer Funktion und ihrer Einsatzgebiete voneinander abweichen, beruhen sie, abgesehen vom Profilrahmen des Montagewagens, auf vergleichbaren Konstruktionsprinzipien. Die Verwendung gleicher oder ähnlicher Verbindungstechniken ermöglicht eine weitgehende Vereinheitlichung der Entwicklung.

Zusätzlich wurde darauf geachtet, einzelne Funktionselemente und Baugruppen möglichst unabhängig voneinander einsetzen zu können. Dies betrifft beispielsweise die Lastaufnahmeeinheit, die tragende Fahrzeugstruktur, die Verkleidungselemente oder die Crashabsorber. Der modulare Aufbau erlaubt es, einzelne Komponenten auszutauschen oder weiterzuentwickeln, ohne die gesamte Fahrzeugkonstruktion grundlegend verändern zu müssen.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich hinsichtlich der Skalierbarkeit. Die Entwicklung eines Fahrzeugs in Holzbauweise erfordert andere konstruktive Überlegungen als bei klassischen Metallkonstruktionen. Durch die konsequente Anwendung eines Baukastensystems können die gewonnenen Erkenntnisse zukünftig auf weitere Fahrzeuggrößen übertragen werden. Damit entsteht eine Grundlage für die Entwicklung einer Skalierungsfunktion, welche die Anpassung der Holzstrukturen an unterschiedliche Last- und Größenklassen unterstützt.

Der modulare Ansatz stellt somit einen wesentlichen Bestandteil der Gesamtentwicklung dar und bildet die Basis für eine wirtschaftliche Nutzung der Holzleichtbauweise bei fahrerlosen Transportfahrzeugen.

4.4 CRASHABSORPTION MITTELS "KERF BENDING"

Neben den hölzernen Fahrzeugstrukturen bildet die Entwicklung eines crashabsorbierenden Funktionselements aus Holz einen weiteren Innovationsschwerpunkt des Projekts.

Kollisionen mit Hindernissen, Betriebseinrichtungen oder anderen Fahrzeugen lassen sich auch bei modernen fahrerlosen Transportsystemen nicht vollständig ausschließen. Aus diesem Grund können die Fahrzeuge zusätzlich mit entsprechenden Schutzeinrichtungen ausgestattet werden, die eine Beschädigung der Fahrzeugstruktur verhindern oder zumindest reduzieren sollen. Konventionelle Lösungen basieren auf elastischen Kunststoffelementen wie Gummipuffern oder zusätzlichen mechanischen Dämpfungssystemen.

Im Rahmen des Projekts wurde ein alternativer Ansatz verfolgt. Ziel war es, die Schutzfunktion unmittelbar durch die konstruktive Gestaltung der ohnehin genutzten Werkstoffe zu realisieren und auf zusätzliche polymere oder metallische Dämpfungselemente zu verzichten.

Hierzu wurden unterschiedliche Konzepte zur Energieabsorption betrachtet. Als besonders vielversprechend erwies sich die Nutzung strukturgeschwächter Holzbauteile, die durch definierte Materialaussparungen lokal nachgiebig gestaltet werden. Durch die Einbringung spezieller Schlitzmuster entstehen Bereiche mit reduzierter Biegesteifigkeit, die sich unter Belastung kontrolliert verformen können. Zur Nutzung als Crashabsorber wurden die geschlitzten Holzteile um 90 Grad gebogen und an den Ecken des Unterfahr-FTFs integriert (Abbildung 4).

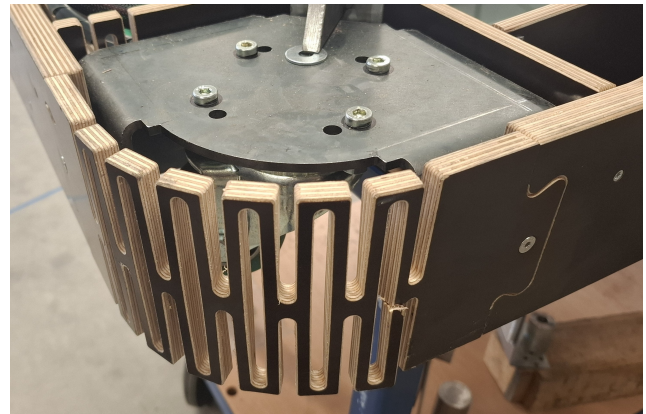


Abbildung 4: Crashabsorber aus WVC-Plattenbauteil in den Ecken des Unterfahr-FTFs



Abbildung 5: Geschlitztes Holzbauteil für Crashabsorber

Das zugrunde liegende Wirkprinzip entspricht dem sogenannten Kerf-Bending. Dabei wird die Steifigkeit eines Holzbauteils durch eine Vielzahl gezielter Einschnitte reduziert (Abbildung 5), sodass größere elastische Ver-

formungen möglich werden. Die entstandenen Bereiche wirken funktional wie Festkörpergelenke und erlauben Bewegungen ohne zusätzliche mechanische Gelenke oder Lager.

Zur Anwendung als Crashabsorber wurden unterschiedliche Geometrien und Schlitzmuster untersucht und mittels mechanischer Versuche bewertet (Abbildung 6). Ziel war, dass die eingeleitete Stoßenergie möglichst effizient, sprich ohne Zerstörung des Crashabsorbers, abgebaut und gleichzeitig die angrenzende Fahrzeugstruktur vor Beschädigungen geschützt werden kann. Der Crashabsorber dient somit als vorgeschaltetes Funktionselement, welches im Kollisionsfall einen Teil der Bewegungsenergie durch (möglichst ausschließlich) elastische Verformung aufnimmt. Die Übertragung der Stoßenergie auf die tragende Struktur wird dadurch reduziert.



Abbildung 6: Gebogenes Holzbauteil (Crashabsorber) in Versuchsvorrichtung

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass sich das Prinzip grundsätzlich für die Anwendung in fahrerlosen Transportfahrzeugen eignet. Gleichzeitig ergibt sich ein neuer Ansatz zur Integration zusätzlicher Funktionen in Holzstrukturen. Während klassische Fahrzeugkonzepte separate Bauteile für Tragstruktur und Energieabsorption benötigen, können hier beide Funktionen innerhalb desselben Systems realisiert werden.

Der Crashabsorber ist ein Beispiel für die technische bzw. funktionale Nutzung der werkstoffspezifischen Eigenschaften im konstruktiven Holzbau.

5 PROTOTYPENTEST

Nach der Herstellung und Inbetriebnahme der Demonstratoren wurden Fahr-, Funktions- und Belastungstests durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, die

grundsätzliche Praxistauglichkeit der entwickelten Fahrzeugkonzepte nachzuweisen, konstruktive Schwachstellen zu identifizieren und Erkenntnisse für die weitere Optimierung der Fahrzeuge zu gewinnen.

Die Erprobung erfolgt auf dem Betriebsgelände der Beldrive Engineering GmbH. Hierfür steht eine speziell für die Untersuchung fahrerloser Transportfahrzeuge genutzte Teststrecke zur Verfügung, auf der unterschiedliche Fahrsituationen, Lastzustände und Betriebsbedingungen nachgestellt werden können (Abbildung 7). Durch realitätsnahe Einsatzbedingungen soll sichergestellt werden, dass die gewonnenen Erkenntnisse auf spätere industrielle Anwendungen übertragbar sind.



Abbildung 7: Fahrversuche des Montagewagens in Testumgebung bei der Beldrive Engineering GmbH

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen zunächst die grundsätzliche Funktionalität der Fahrzeuge sowie die Bewertung der Holzstruktur unter realistischen Belastungsszenarien. Es wurden sowohl Leerfahrten als auch Fahrten mit unterschiedlichen Zuladungen durchgeführt. Neben der sicheren Funktion der Fahrzeugtechnik wurde das Zusammenwirken zwischen den elektronischen Komponenten und der tragenden Holzstruktur betrachtet.

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand war außerdem die Evaluierung der angestrebten Tragfähigkeit der Fahrzeugmuster. Beide Demonstratoren wurden schrittweise mit steigenden Lasten beaufschlagt und hinsichtlich ihres Verhaltens untersucht. Dabei wurde überprüft, ob die konstruktiv vorgesehenen Lastpfade stimmen, ob unzulässige Verformungen auftreten und ob die Fahrzeugtechnik unter Last zuverlässig arbeitet.

Darüber hinaus wurden verschiedene Fahrmanöver untersucht. Hierzu zählen insbesondere Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, Richtungswechsel sowie Fahrten über Unebenheiten innerhalb der Testumgebung. Ziel war es, mögliche Schwachstellen hinsichtlich Steifigkeit, Schwingungsverhalten und Verbindungstechnik frühzeitig zu erkennen.

Neben der unmittelbaren Holzstruktur wurden auch die konstruktiven Schnittstellen zwischen Holzstruktur und Fahrzeugtechnik betrachtet. Da die Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Stahlkonstruktionen über veränderte elastische Eigenschaften verfügen, galt es zu prüfen, ob sich daraus Einflüsse auf die Funktion der Antriebs- und Steuerungstechnik ergeben.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Bewertung des Energiebedarfs. Hierfür wurden Vergleichsmessungen zwischen einem konventionellen Fahrzeug in Stahlbauweise und einem Fahrzeug in Holzleichtbauweise durchgeführt. Beide Fahrzeuge waren mit vergleichbarer Fahrzeugtechnik ausgestattet und absolvierten identische Fahrzyklen auf einem definierten Rundkurs. Dadurch sollte untersucht werden, in welchem Umfang die Gewichtsreduzierung der Holzbauweise zu einer Verringerung des Energieverbrauchs beiträgt.

Zusätzlich wurden die entwickelten Crashabsorber untersucht. Hierbei stand insbesondere die Frage im Vordergrund, ob sich die konstruktiv erzeugten Festkörpergelenke unter Belastung wie vorgesehen verformen und ob die Energieaufnahme ausreichend ist, um die Fahrzeugstruktur zu entlasten. Darüber hinaus wurde bewertet, inwieweit sich die Funktionselemente in die Gesamtstruktur integrieren lassen und welche Auswirkungen sie auf Fertigung, Montage und Betrieb besitzen.

Die Untersuchungen erfolgen fortlaufend und begleiten die Weiterentwicklung der Fahrzeugkonzepte. Die gewonnenen Erkenntnisse werden unmittelbar in die Konstruktion neuer Fahrzeugvarianten übernommen und dienen als Grundlage für weitere Optimierungsschritte.

6 BISHERIGE ERGEBNISSE

Die bisherigen Arbeiten bestätigen die grundsätzliche technische Machbarkeit, fahrerlose Transportfahrzeuge in Holzleichtbauweise umzusetzen. Sowohl das Unterfah-FTF als auch der Montagewagen konnten erfolgreich gebaut und in Betrieb genommen werden. Die Fahrzeuge absolvieren derzeit noch Praxistests und werden kontinuierlich weiterentwickelt.

Besonders hervorzuheben ist die Umsetzung zweier unterschiedlicher Fahrzeugtypen. Während das Unterfah-FTF eine kompakte und flache Bauweise repräsentiert, besitzt der Montagewagen einen deutlich größeren und teils komplexeren Aufbau. Die erfolgreiche Realisierung beider Fahrzeuge zeigt, dass die Holzleichtbauweise nicht auf einzelne Spezialanwendungen beschränkt ist, sondern grundsätzlich auf unterschiedliche Fahrzeugklassen angewendet werden kann. Beide Fahrzeuge erreichen die jeweils vorgesehene Traglast von 1.500 kg. Abbildung 8 zeigt ein entsprechend beladenes Holzfahrzeug. Damit

bestätigt sich, dass Furnierwerkstoffe tragende Funktionen konventioneller Metallbauteile übernehmen können.



Abbildung 8: Beladenes Unterfah-FTF bei der Beldrive Engineering GmbH

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Bewertung des Leichtbaupotenzials. Bei dem Unterfah-FTF konnte eine Gewichtsreduzierung von rund 25 % im Vergleich zum konventionellen Metallfahrzeug des Herstellers Beldrive Engineering GmbH erzielt werden [2]. Die Verringerung der bewegten Fahrzeitmasse (bei gleichzeitig ausreichender Tragfähigkeit) wurde durch den eingesetzten Holzwerkstoff (WVC) bzw. dessen spezifische Festigkeit ermöglicht.

Die Gewichtsreduzierung wirkt sich unmittelbar auf den Energiebedarf des Fahrzeugs aus. Vergleichsmessungen zeigen, dass das Holz-FTF insbesondere bei Leerfahrten einen geringeren Energieverbrauch aufweist als das entsprechende Referenzfahrzeug in Stahlbauweise. Im untersuchten Szenario konnte eine Energieeinsparung von rund 14 % nachgewiesen werden. Mit zunehmender Nutzlast nimmt dieser Vorteil erwartungsgemäß ab, da der Anteil des Fahrzeuggewichts an der Gesamtmasse sinkt. Dennoch verdeutlichen die Ergebnisse den engen Zusammenhang zwischen Fahrzeugmasse und Energiebedarf und bestätigen das Potenzial der Holzleichtbauweise zur Steigerung der Energieeffizienz intralogistischer Transportsysteme.

Neben den Vorteilen im Betrieb ergeben sich auch Potenziale hinsichtlich der Herstellung der Fahrzeuge. Während Stahlkonstruktionen typischerweise mehrere energie- und prozessintensive Fertigungsschritte wie Laserschneiden, Schweißen, Korrosionsschutz und Beschichtung erfordern, können die Holzstrukturen überwiegend durch CNC-Bearbeitung sowie anschließendes Fügen und Verschrauben hergestellt werden. Dadurch lassen sich Fertigungsprozesse vereinfachen sowie Produktions- und Logistikaufwände reduzieren.

Darüber hinaus konnten weitere werkstoffbedingte Vorteile beobachtet werden. Die natürliche

Schwingungsdämpfung der Holzstruktur trägt dazu bei, Vibrationen zu reduzieren und dadurch empfindliche Fahrzeugkomponenten wie Sensoren, Kameras oder LiDAR-Systeme zu entlasten. Gleichzeitig ermöglicht der modulare Aufbau der Fahrzeuge, einen vergleichsweise einfachen Austausch einzelner Bauteile und verbessert dadurch die Wartungsfreundlichkeit und Langlebigkeit. Neben den technischen Eigenschaften bieten Holzwerkstoffe aufgrund ihrer regionalen Verfügbarkeit sowie ihrer positiven Wahrnehmung als nachhaltiger Werkstoff zusätzliche ökologische und wirtschaftliche Potenziale.

Ein weiterer Projekterfolg besteht in der Entwicklung des crashabsorbierenden Funktionselements auf Basis strukturgeschwächter Holzbauteile. Durch gezielte Materialaussparungen und die Ausbildung von Festkörpergelenken konnte das Prinzip des Kerf-Bending erfolgreich auf die Anforderungen eines fahrerlosen Transportfahrzeugs übertragen werden. Die Untersuchungen zeigen, dass Holzstrukturen neben ihrer tragenden Funktion gleichzeitig energieabsorbierende Eigenschaften übernehmen können. Dadurch entstehen neue Möglichkeiten für multifunktionale Leichtbaustrukturen, bei denen zum Beispiel tragende und schützende Funktionen innerhalb desselben Bauteils integriert werden.

Die bisherigen Entwicklungsarbeiten verdeutlichen außerdem, dass die Übertragung konventioneller Stahlkonstruktionen auf entsprechende Holzstrukturen allein nicht zielführend ist. Vielmehr müssen die werkstoffspezifischen Eigenschaften bereits während der frühen Konstruktionsphase berücksichtigt und gezielt genutzt werden. Dies betrifft insbesondere die Gestaltung von Verbindungen, die Ausbildung geeigneter Lastpfade sowie die funktionale Integration weiterer Bauteile. Die Umsetzung einer zweiten Fahrzeuggeneration des Unterfahr-FTF sowie die derzeit laufende Überarbeitung des Montagewagens bestätigen die Fähigkeit zur Weiterentwicklung der entwickelten Fahrzeugkonzepte.

Insgesamt zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass Holzleichtbauweisen nicht nur eine nachhaltige Alternative zu konventionellen Metallkonstruktionen darstellen, sondern gleichzeitig technische Vorteile hinsichtlich Gewicht, Energieeffizienz, Fertigungsaufwand und Funktionsintegration (Dämpfung, Energieabsorption) bieten. Damit bilden die entwickelten Demonstratoren eine belastbare Grundlage für die weitere Optimierung und zukünftige industrielle Anwendung modularer Holz-FTF.

7 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Das Verbundprojekt WVC-FTF“ verfolgt das Ziel, Holzwerkstoffe als nachhaltige Alternative für die Struktur fahrerloser Transportfahrzeuge nutzbar zu machen und gleichzeitig neue Ansätze für den konstruktiven Leichtbau

in der Intralogistik zu entwickeln. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass dieses Ziel grundsätzlich erreicht werden konnte. Mit der erfolgreichen Entwicklung und Erprobung zweier unterschiedlicher Fahrzeugtypen (Abbildung 9) wurde nachgewiesen, dass Furnierwerkstoffe die funktionalen und mechanischen Anforderungen moderner FTF erfüllen können.



Abbildung 9: Unterfahr-FTF und Montagewagen in Holzbauweise bei der Beldrive Engineering GmbH

Besonders hervorzuheben sind die nachgewiesenen Vorteile hinsichtlich Gewicht und Energieeffizienz. Durch die deutliche Reduzierung der Fahrzeugmasse konnte der Energiebedarf insbesondere bei Leerfahrten spürbar gesenkt werden. Da Leerfahrten in intralogistischen Prozessen einen erheblichen Anteil der gesamten Fahrleistung ausmachen und gleichzeitig keine direkte Wertschöpfung erzeugen, besitzen Gewichtsreduzierungen in diesen Betriebszuständen ein großes Einsparpotenzial. Die Ergebnisse verdeutlichen damit, dass nachhaltige Werkstoffe nicht ausschließlich unter ökologischen Gesichtspunkten betrachtet werden sollten, sondern zugleich messbare technische und wirtschaftliche Vorteile bieten können.

Neben den Betriebseigenschaften eröffnet die Holzbauweise zusätzliche Potenziale entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Vereinfachte Fertigungsprozesse, geringere Herstellungsaufwände, reduzierte graue Energie sowie die Nutzung regional verfügbarer nachwachsender Rohstoffe leisten einen Beitrag zur Verbesserung der ökologischen Gesamtbilanz. Gleichzeitig ermöglichen die gute Schwingungsdämpfung sowie der modulare Fahrzeugaufbau zusätzliche funktionale Vorteile hinsichtlich Bauteilschutz und Wartungsfreundlichkeit.

Mit dem entwickelten Crashabsorber konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Holzwerkstoffe nicht ausschließlich tragende Aufgaben übernehmen müssen. Die erfolgreiche Integration von Festkörpergelenken durch strukturgeschwächte Holzbauteile eröffnet neue Möglichkeiten zur Realisierung multifunktionaler Leichtbaustrukturen, bei denen tragende, bewegliche und energieabsorbierende Funktionen innerhalb einer gemeinsamen Struktur kombiniert werden.

Auch der modulare Fahrzeugaufbau hat sich als geeignete Grundlage für die zukünftige Skalierung unterschiedlicher Fahrzeuggrößen erwiesen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Entwicklung eines modularen Baukastensystems, das eine wirtschaftliche Umsetzung verschiedener Fahrzeugklassen ermöglichen soll.

Trotz der bereits erzielten Fortschritte besteht weiterer Entwicklungsbedarf. In der verbleibenden Projektlaufzeit stehen die Optimierung der bestehenden Demonstratoren sowie die Skalierung der Fahrzeugkonzepte im Mittelpunkt. Darüber hinaus sollen Langzeituntersuchungen zum Dauerverhalten der Holzstrukturen und Verbindungen, weiterführende Untersuchungen der Crashabsorber sowie zusätzliche Analysen zur Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden.

Insgesamt zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass Holzleichtbauweisen ein vielversprechender Ansatz für zukünftige fahrerlose Transportfahrzeuge sind. Die Kombination aus geringem Eigengewicht, hoher spezifischer Festigkeit, vereinfachter Fertigung, reduziertem Energiebedarf und multifunktionalen Strukturkonzepten, eröffnet neue Möglichkeiten für nachhaltige intralogistische Fördersysteme und unterstreicht das Potenzial nachwachsender Werkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau.

8 DANKSAGUNG

Das Projekt findet im Rahmen der FuE-Projektförderung zur Entwicklung neuer Produkte und Verfahren und zur Erhöhung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit“ der Sächsischen Aufbaubank (SAB) statt und wird kofinanziert von der Europäischen Union sowie vom Freistaat Sachsen.

Die Autoren danken der Beldrive Engineering GmbH und der Ligenium GmbH für die enge Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Fahrzeugkonzepte sowie der Fertigung und Erprobung der Demonstratoren.

LITERATUR

- [1] M. Geistert, “Funktionalisierte Strukturelemente für Transportsysteme in Holzleichtbauweise,” in *Logistics Journal: Proceedings*, Nr. 20 (2024). Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU-Dortmund für die Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL e. V.), 2024.
- [2] T. Wagner, “Alternative und nachhaltige Materialkonzepte für agv,” in *Tagungsband Logistikwerkstatt Graz 2026*, Technische Universität Graz, Institut für Technische Logistik. Domenik Kaever, Christian Landschützer, 2026.

Max Geistert, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Förder- und Materialflusstechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Dr.-Ing. Sven Eichhorn, Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Förder- und Materialflusstechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Leiter der Professur Förder- und Materialflusstechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Technische Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Telefon: +49 (0) 371 531 23110, E-Mail: ftm@mb.tu-chemnitz.de, Web: www.tu-chemnitz.de/mb/FoerdTech

Beldrive Engineering GmbH, Einsiedler Hauptstraße 26, 09123 Chemnitz-Einsiedel, Telefon +49 (0) 37209 69050, E-Mail: beldrive@beldrive.com, Web: www.beldrive.de

LiGenium GmbH, Annaberger Straße 240, 09125 Chemnitz, Telefon: +49 (0) 371 646 1460, E-Mail: info@ligenium.de, Web: www.ligenium.de