

# Funktionalisierte Strukturelemente für Transportsysteme in Holzleichtbauweise

Functionalized structural elements for Transportation systems in lightweight wood construction

Max Geistert  
Sven Eichhorn  
Markus Golder

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

**D**er Beitrag widmet sich der Funktionalisierung der Strukturelemente eines Transportsystems in Holzleichtbauweise. Ziel war es, die Holzstrukturelemente konstruktiv so zu gestalten, dass sensorische und elektronische Bauteile darin implementiert werden können, ohne die ursprüngliche Funktion des Systems – das Zusammenfassen und effiziente Befördern von Fördergut – zu beeinträchtigen. Dadurch sollte eine Überwachung des Transportsystems und der transportierten Güter ermöglicht werden. Im Rahmen der experimentellen Entwicklung des Systems wurden Ansätze erarbeitet, elektronische Bauteile entsprechend in die Transportmodule einzubetten. Durch Feldtests wurde die Gebrauchstauglichkeit der modifizierten Komponenten, des gesamten Transportsystems sowie der Sensorik und Elektronik geprüft. Ein Testanwender hat die hergestellten Prototypen in dessen intralogistische Prozesse eingebunden. Durch die funktionalisierten Holzkomponenten und die darin implementierte Messtechnik wurde eine Grundlage für die Digitalisierung von logistischen Abläufen mit Transportsystemen in Holzleichtbauweise geschaffen.

[Schlüsselwörter: Transportsystem, Holzwerkstoff, Leichtbauweise, Funktionalisierung, Sensorisierung]

**T**his article focuses on the functionalization of structural elements of transport aids in lightweight wood construction. The aim was to design the wooden structural elements in such a way that sensory and electronic components can be implemented in them without impairing the original function of the system - the grouping and transportation of goods. This should enable the transport system and the transported goods to be monitored. As part of the experimental development of the system, approaches were developed to embed electronic components in the transport modules accordingly. The suitability for use of the modified components, the entire transport system and the sensors and electronics was

tested in field tests. A test user integrated the manufactured prototypes into its intralogistics processes. The functionalized wooden components and the measurement technology implemented in them created a basis for the digitalization of logistical processes with transport systems in lightweight wood construction.

[Keywords: Transportation system, Wood material, Lightweight construction, Functionalization, Sensorization]

## 1 EINLEITUNG

In einer zunehmend vernetzten Welt, in der Geschwindigkeit ein entscheidender Wettbewerbsfaktor ist, spielen digitale Prozesse eine zentrale Rolle. Angesichts wachsender Handelsvolumina, gestiegener Kundenanforderungen und anhaltendem Preisdrucks stehen insbesondere Unternehmen der Logistikbranche vor der Herausforderung, ihre Abläufe möglichst effizient und transparent zu gestalten. Digitale Technologien erlauben die Automatisierung logistischer Prozesse und schaffen die Möglichkeit, den Güter- und Informationsfluss zu optimieren. Von automatisierten Lagerverwaltungssystemen bis hin zur Echtzeitüberwachung von Transportmitteln oder Gütern – digitale Technologien bieten ein beispielloses Potenzial zur Effizienzsteigerung in der Logistik.

Transportsysteme sind essenziell für die Umsetzung logistischer Prozesse, indem sie Transportgüter aufnehmen, zu größeren Einheiten zusammenfassen und von einem zum anderen Ort verbringen. Konventionell tragen sie jedoch wenig zu einem digitalen Waren- und Informationsfluss und somit zur Produktivitätssteigerung in der Logistikkette bei. In Zusammenarbeit mit der LiGenium GmbH und der Mogatec GmbH wurde ein Transportsystem entwickelt, das diesen Nachteil überwinden soll. Dazu wurden die Systemkomponenten in funktionalisierter Holzbauweise umgesetzt, um somit die Implementierung von Sensoren und entsprechender Auswertelektronik zu gestatten.

Dadurch wird die Überwachung des Systems und des Förderguts ermöglicht und ein Grundstein für die Digitalisierung von Transportprozessen mit Transportsystemen in Holzbauweise gelegt. Die Verwendung von Holzwerkstoffen bringt zusätzliche ökologische Vorteile gegenüber den herkömmlichen Transportsystemen aus Metall mit sich und unterstützt die Entwicklung nachhaltiger, leichter und flexibler Logistikkösungen. Das Transportsystem ist somit ökonomisch, ökologisch und technisch vorteilhaft.

## 2 ZIELSTELLUNG

Im ingenieurwissenschaftlichen Kontext bezeichnet der Begriff Funktionalisierung den Prozess, durch den zusätzliche Funktionen oder Eigenschaften in ein Material, eine Komponente oder ein System integriert werden. Auf den verschiedenen Ebenen kann dies auf unterschiedliche Weise geschehen. Auf der Materialebene werden Materialien so modifiziert, dass sie neben ihrer ursprünglichen mechanischen Funktion auch zusätzliche Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit besitzen. Auf der Komponentenebene bedeutet Funktionalisierung, dass Komponenten neben ihrer z.B. tragenden oder stabilisierenden Funktion zusätzliche Aufgaben wie die Erfassung von Berührungen übernehmen. Auf Systemebene wird ein gesamtes System so gestaltet, dass es neben seiner Primärfunktion auch weitere Zusatzfunktionen erfüllen kann.

Im Sinne des entwickelten Transportsystems geht die Funktionalisierung einzelner Komponenten mit einer Funktionalisierung des gesamten Systems einher. In die Holzstrukturelemente werden sensorische und elektronische Komponenten integriert, die das Strukturelement selbst oder die damit in Kontakt stehenden Bauteile überwachen. Zugleich ermöglicht dies die Beobachtung des gesamten Transportsystems und liefert Informationen über dessen Zustand, den Zustand aller darin befindlichen Transportgüter oder die Umgebungsbedingungen.

Die Funktionalisierung verfolgt mehrere Ziele. Vorrangig soll die Effizienz des Transportprozesses gesteigert werden. Durch die Zustandsüberwachung der Transportgüter können Lager- und Lieferprozesse optimiert sowie Ressourcen effektiver eingesetzt werden. Die Überwachung des Transportsystems selbst zielt darauf ab, dessen Lebensdauer zu verlängern. Eine kontinuierliche Beobachtung des Systems und der Umgebungsbedingungen ermöglicht es, Wartungsbedarfe frühzeitig zu erkennen und somit die Sicherheit des Gesamtsystems zu erhöhen. Darüber hinaus soll die Funktionalisierung die Einsatzmöglichkeiten des Transportsystems erweitern. So könnte es beispielsweise als „Zählwaage“ oder „Smart Container“ genutzt werden.

Das Gesamtziel ist es, ein ohnehin erforderliches Transportsystem durch die Integration neuer Funktionen leistungsfähiger und vielseitiger zu gestalten.

## 3 METHODIK

Im Rahmen der gemeinsamen Entwicklungstätigkeit zwischen der Professur für Förder- und Materialflusstechnik der TU Chemnitz und der LiGenium GmbH, wurde ein Transportsystem in funktionalisierter Holzleichtbauweise entworfen und zur Testanwendung teilweise realisiert. Das System besteht aus unterschiedlichen Modulen, darunter eine Transportplattform sowie Groß- und Sonderladungsträger, mit verschiedenen Modifikationen und ist für den Transport von Kleinteilen und Stückgütern unterschiedlicher Abmessungen und Lasten ausgelegt. Aus den einzelnen Modulen lässt sich ein Transportwagen zusammenstellen, welcher für den konkreten Anwendungsfall angepasst ist.

Die Holzstrukturelemente wurden so konzipiert, dass die Sensoren zur Zustandsüberwachung sowie die erforderlichen elektronischen Bauteile zur Signalverarbeitung sicher im Werkstoff eingebettet werden können, gleichzeitig aber eine störungsfreie Aufnahme der Transportgüter möglich ist. Dabei war es entscheidend, die strukturelle Integrität der Holzkonstruktion zu wahren, sodass die Transporthilfsmittel weiterhin den möglichen Transportbelastungen standhalten können. Die ursprüngliche Funktion des Systems – der sichere Transport von Fördergut – sollte somit uneingeschränkt erhalten bleiben.

Die Konzepte zur Funktionalisierung der Holzstrukturelemente wurden mittels Funktionsmustern getestet. Anschließend wurden einige Module als Prototypen realisiert. In diese Module wurden die vorgesehenen sensorischen und elektronischen Komponenten integriert und unter realen Anwendungsbedingungen auf ihre Zuverlässigkeit untersucht. Dabei lag besonderes Augenmerk darauf, dass sich die Sensoren und die Auswertelektronik sicher und dauerhaft im Holzwerkstoff einbetten lassen und langfristig funktionsfähig bleiben. Durch den Einsatz beim Testanwender konnten Schwachstellen an den funktionalisierten Holzkomponenten identifiziert und die Strukturelemente weiterentwickelt werden.

## 4 UMSETZUNG

### 4.1 AUFBAU DER PROTOTYPEN

Das entwickelte Transportsystem setzt sich aus fünf zueinander kompatiblen Modulen mit unterschiedlichen Modifikationen zusammen (Abbildung 1). Die beiden Grundmodule des Systems sind Ladungsträger (1), die der Aufnahme der Transportgüter dienen, sowie eine mobile Transportplattform (4), die den manuellen oder maschinellen Transport der Ladungsträger ermöglicht. Daneben stehen zwei Adapter-Module zur Verfügung. Diese ermöglichen zum einen die Verknüpfung der Ladungsträger mit der mobilen Transportplattform (3) und zum anderen den Transport der Plattform durch fahrerlose Transportsysteme

oder Hubwagen (5). Darüber hinaus können die Ladungsträger mit einer Kufenstruktur (2) – je nach Anforderungsprofil in Holz- oder Metallbauweise – ausgestattet werden. Dies gestattet eine Beförderung auch ohne die Transportplattform per Stapler oder Hubwagen und erleichtert das Stapeln mehrerer Ladungsträger übereinander. [1]

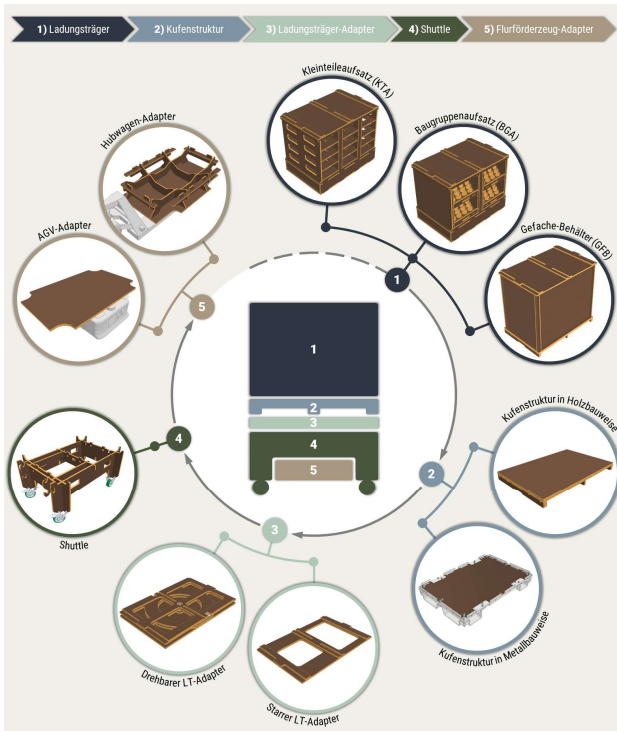


Abbildung 1. Schematischer Aufbau des Transportsystems

Abbildung 1 [2] stellt die Zusammensetzung des Transportsystems schematisch dar. Es ist erkennlich, dass für vier der fünf Module unterschiedliche Modifikationen zur Auswahl stehen.

Bei der Entwicklung des Transportsystems stand Modularität im Fokus. Jedes Modul erfüllt eine spezifische Funktion und kann bei Bedarf unabhängig von den anderen Modulen genutzt werden. Dennoch sind alle Module so konzipiert, dass sie sich leicht miteinander verbinden lassen um einen individuellen Transportwagen daraus zu kombinieren. Hierfür wurden standardisierte Schnittstellen genutzt. Die Modularität ermöglicht es, das System flexibel zu erweitern, zu verändern oder anzupassen, indem Module hinzugefügt, entfernt oder ausgetauscht werden können, ohne dass eine grundlegende Neugestaltung erforderlich ist. Dies bringt Vorteile wie Wartungsfreundlichkeit und Skalierbarkeit mit sich. Denn Module können einzeln entwickelt, hergestellt und integriert oder ersetzt werden.

Der modulare Aufbau des Transportsystems folgt einem Baukastensystem. Die Module enthalten standardisierte, teilweise austauschbare Holzkomponenten, die für unterschiedliche Lösungen verwendbar sind. Die Groß- und Sonderladungsträger, die Kufenstrukturen sowie die

dazugehörigen Adapter basieren alle auf den einheitlichen Grundmaßen von 800 mm x 1.200 mm. Dadurch können Komponenten wie Grund- und Deckplatten sowie Seitenwände wiederverwendet werden und erfordern gegebenenfalls nur minimale Anpassungen an spezifische Anforderungen. Auch die Transportplattform ist an die Grundmaße der Adapter und Ladungsträger angepasst. Da diese Maße ein standardisiertes und weit verbreitetes Format darstellen, kann der Wagen auch separat für den Transport anderer Güter genutzt werden. Die Holzkufen und die entsprechenden Aufnahmen zur Fixierung und Zentrierung der Kufen lassen sich in allen Modulen integrieren, was die Kompatibilität der Module untereinander gewährleistet.



Abbildung 2. Ladungsträger mit Holzkufer auf einem Transportwagen mit Hubwagen- und starrem Stapel-Adapter

Alle Module wurden in Holzleichtbauweise realisiert. Ziel war es, die konventionell genutzten Metallwerkstoffe zu substituieren. Unter der Verwendung von Holz bzw. Holzwerkstoffen als Hauptmaterial, sollte eine leichte aber dennoch stabile und belastbare Struktur geschaffen werden. Somit sollte das hohe Gewicht herkömmlicher Transportsysteme reduziert werden, ohne die Stabilität unzulässig zu beeinflussen.

Für die Grundstrukturen kam ausschließlich der Holzwerkstoff WVC (Wood Veneer Composite, dt.: Holzfurnierlagenverbundwerkstoff) zum Einsatz. Gegenüber anderen Holzwerkstoffen hebt er sich durch seine vorteilhaften

mechanischen Eigenschaften, insbesondere eine hohe Biegefestigkeit und Formstabilität, ab. Im Vergleich zu Metallwerkstoffen überzeugt WVC vor allem durch sein deutlich geringeres Gewicht, eine bessere Umweltverträglichkeit und eine höhere Verarbeitungsfreundlichkeit.

#### 4.2 FUNKTIONALISIERUNG DER STRUKTURELEMENTE

Holzwerkstoffe gelten als verarbeitungsfreundlich. Dank der vergleichsweise geringen Dichte und Härte von Holzwerkstoffen sind hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten möglich. Weiterhin liefert die Fräsbearbeitung eine hohe Oberflächenqualität, die oft nur minimaler oder gar keiner Nachbearbeitung bedarf. Zudem lassen sich Komponenten aus Holzwerkstoffen unter Anwendung geeigneter Konstruktionsprinzipien einfach und flexibel miteinander verbinden. Präzise gefertigte Steck- und Zapfenverbindungen ermöglichen das Zusammenfügen von Holzelementen ohne Klebstoff und erfordern in der Regel nur wenige Schrauben zur Lagefixierung. Diese Vorteile wurden gezielt bei der Entwicklung der Bauteilaufnahmen für das Transportsystem sowie bei der Funktionalisierung der dafür verwendeten Holzelemente genutzt.

Der Testanwender hat zwei verschiedene Transportszenarien mit unterschiedlichen Transportgütern vorgegeben, auf die die Ladungsträger bzw. Bauteilaufnahmen abgestimmt wurden. Zum einen sollten in Standardbehältern vorkommissionierte Kleinteile befördert und gleichzeitig der Füllstand der Behälter erfasst und ausgegeben werden. Zum anderen sollten spezielle Baugruppen des Herstellers in dafür angepassten Aufnahmen transportiert, zugleich die korrekte Positionierung der Baugruppen überprüft und die Anzahl der eingelegten Baugruppen angezeigt werden.

Zur Beförderung der Standardbehälter wurde ein Sonderladungsträger mit mehreren Fächern entworfen, in die die Behälter eingeschoben werden können (Abbildung 3). Um einen möglichst hohen Füllgrad zu gewährleisten und da kein direkter Einblick in die Behälter erforderlich war – der Füllstand sollte außerhalb visualisiert werden – wurde die Höhe der Fächer an die der Behälter angepasst. Zur Bestimmung des Füllstands sollte das aktuelle Füllgewicht mit dem maximal möglichen Füllgewicht abgeglichen werden. Hierfür kamen Drucksensoren zum Einsatz. Um eine ungleichmäßige Gewichtsverteilung zu kompensieren, wurden pro Fach vier Drucksensoren an den jeweiligen Ecken positioniert. Da die Böden der Behälter oftmals uneben sind, sollten die Behälter keinen direkten Kontakt zu den Sensoren haben. Dies könnte einerseits zu Ungenauigkeiten bei der Messung führen und andererseits besteht eine Beschädigungsgefahr durch die Handhabung der Behälter. Daher wurde eine Adapterplatte zwischen den Behältern und den Sensoren installiert. Die Sensoren wurden sicher in den Ladungsträger bzw. die dafür vorgesehenen Zwischenböden integriert, indem diese mit an die Sensorkontur

angepassten Aussparungen versehen wurden. Zur Kabelführung wurden Kanäle in die entsprechenden Holzkomponenten gefräst. Zudem wurde an der Vorderseite der Zwischenböden Material abgetragen, um einen LED-Streifen bündig einbringen zu können, der den Füllstand visualisiert (Abbildung 4). Alle elektronischen Bauteile zur Signalverarbeitung wurden sicher in einer mittigen Rinne in dem Sonderladungsträger untergebracht.



Abbildung 3. *Transportplattform mit Sonderladungsträger zur Beförderung von Standardbehältern*



Abbildung 4. *Sensorik zur Erfassung des Füllgewichts von mit Kleinteilen befüllten Standardbehältern*

Für die sichere Positionierung und den Transport der Baugruppen wurden speziell an deren Form angepasste Bauteilaufnahmen konzipiert. Diese wurden als Schubkästen gestaltet, sodass sie sich leicht aus dem dafür vorgesehenen Sonderladungsträger (Abbildung 2) herausziehen lassen, was ein komfortables Einlegen der Baugruppen

möglich macht. Alle in eine Bauteilaufnahme eingelegten Baugruppen sollten erfasst und deren Vorhandensein angezeigt werden. Zu diesem Zweck sollte ebenfalls eine elektrische Druckmessung durchgeführt werden.

Innerhalb eines Schubkastens wurden jeweils zwei geneigte Rückwände sowie Bodenplatten übereinander angeordnet. Diese tragen die eingelegten Baugruppen. Die Platten sind fest mit den Seitenwänden verbunden und verleihen der gesamten Struktur Stabilität. Die geneigte, offene Front des Gehäuses ermöglicht einen einfachen Zugang zu den Aufnahmen und gestattet ein ergonomisches Einlegen und Entnehmen der Baugruppen.



Abbildung 5. Bauteilaufnahme mit funktionalisierten Holzstrukturelementen

In den Rückwänden befinden sich speziell an die Form und Größe der Baugruppen angepasste Aussparungen, die einen sicheren Halt gewährleisten. Gefaste Kanten führen die Füße der Baugruppen präzise in die dafür vorgesehenen Hohlräume, wodurch die richtige Positionierung sichergestellt wird. Durch die die Füße umschließenden Erhebungen wird ein Verschieben der Baugruppen auch während des Transports verhindert. In den Bodenplatten wurde Material so abgetragen, dass die Baugruppen nur an einem Punkt aufliegen. An genau dieser Stelle wurden die Drucksensoren positioniert. Um ein störungsfreies Einlegen und Entnehmen der Baugruppen zu garantieren, sind die Sensoren im Werkstoff eingebettet. Hierfür wurden konturangepasste Aussparungen in die Bodenplatten gefräst (Abbildung 6).

Die elektrischen Leitungen wurden unter der Front entlang zu einem ebenfalls im Schubkasten integrierten Mikrocontroller geführt, sodass die primäre Funktion der Bauteilaufnahme nicht gestört wird und die Signalleitung für den Anwender unsichtbar erfolgt (Abbildung 7).

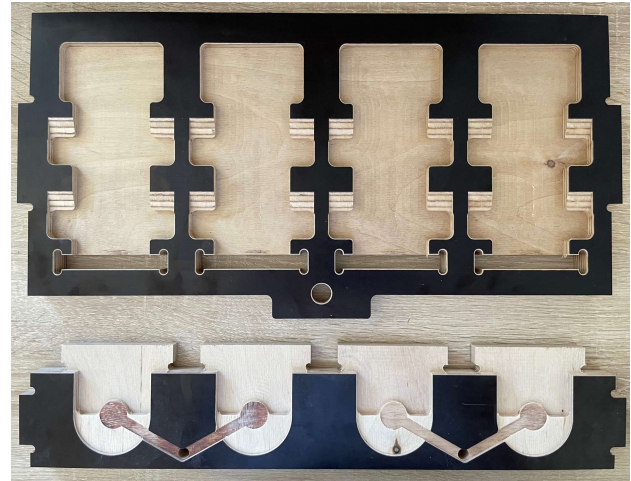


Abbildung 6. Holzstrukturelemente mit Ausfräsungen

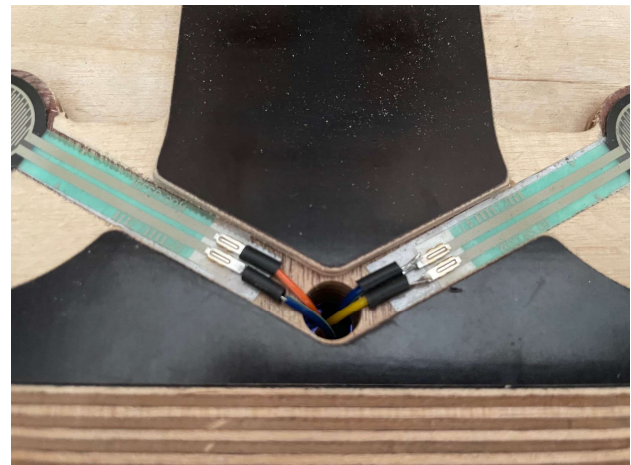


Abbildung 7. Bodenplatte mit konturangepassten Aussparungen für Drucksensoren und Kabeldurchlass

Der Mikrocontroller steuert eine in der Schubkastenfront implementierte LED-Leiste, die die Anzahl der eingelegten Baugruppen visualisiert. Darüber hinaus übermittelt der Mikrocontroller die erfassten Daten an ein im Ladungsträger integriertes Mobilgerät bzw. an die darauf installierte Datenerfassungssoftware.

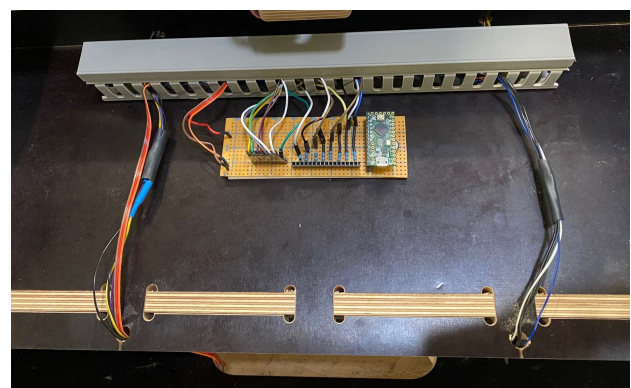


Abbildung 8. Mikrocontroller und elektrische Leitungen hinter der Schubkastenfront

### 4.3 FUNKTIONALISIERUNG DES GESAMTSYSTEMS

Das Mobilgerät, Peripheriegeräte, Akkus, ein Messverstärker und weitere Sensoren sind sicher in einem eingehausten Schubkasten unterhalb des Ladungsträgers und in einer mittigen Rinne innerhalb des Transportmoduls untergebracht. Wie bereits erwähnt, sollte nicht nur der Zustand der transportierten Güter sondern auch des Transportsystems selbst sowie die Umgebungsbedingungen überwacht werden. Hierzu wurden zusätzlich Kabel- und Kompaktfühler zur Temperatur- und Feuchtemessung, Vibrationsaufnehmer zur Schwingungsmessung, gestickte Dehnungsmessstreifen zur Verformungsmessung und ein GPS-Sender zur Standortüberwachung installiert.



Abbildung 9. Schubfach mit Holzbauteilen für elektronische Komponenten

Zur Befestigung der elektronischen Komponenten, wie den Messverstärker, die Akkus und das Batterieladegerät, wurden maßgefertigte Holzbauteile eingesetzt. Die Bodenplatte des Schubfachs wurde so konzipiert, dass die einzelnen Bauteile flexibel darauf angeordnet und sicher fixiert werden können. Der Messverstärker als sensibelste Komponente des Sensorsystems wurde elastisch gelagert.

Die installierte Messtechnik ist ein Laborsetup und ist bezüglich Umfang und Komplexität nicht praxistauglich im Sinne einer Serienanwendung. Der Fokus lag auf einer hohen Datendichte. Für eine Serienanwendung müssen einfacherer und kostengünstige System implementiert werden.

### 5 PROTOTYPENTEST

Nachdem die anfänglich erarbeiteten Konzepte zur Integration von sensorischen und elektronischen Komponenten in Strukturelemente aus WVC durch einfache Funktionsmuster getestet, wiederholt überarbeitet und schließlich in Form der beschriebenen prototypischen Aufbauten realisiert wurden, erfolgten Tests unter Feldbedingungen. Ziel der Feldtests war es, die funktionalisierten Holzbauteile, die eingesetzten Sensoren, die Auswerteelektronik sowie das gesamte Transportsystem hinsichtlich der Grenzen der Praxistauglichkeit zu untersuchen. Weiterhin wurde die Leistungsfähigkeit und Anwenderfreundlichkeit des Systems bewertet. Darüber hinaus sollten potenzielle Probleme identifiziert werden, die in der realen Anwendungsumgebung auftreten könnten und die anhand der Funktionsmuster möglicherweise nicht erkennbar waren.

Zur Prüfung der Prototypen wurden spezifische Transportszenarien des Testanwenders durchlaufen, welche dessen reale logistischen Prozesse abbilden. Eines der Transportmodule musste demnach kontinuierlich mit Behältern be- und entladen sowie mitsamt der Behälter durch die Lager- und Produktionshallen bewegt werden. Die Behälter sollten währenddessen mit Kleinteilen unterschiedlicher Art und Menge befüllt und wieder geleert werden. Das andere Transportmodul galt es, mit Baugruppen zu bestücken und die Elektronik fortwährend durch die Betätigung der Schubkästen zu bewegen. Dieses Modul sollte sowohl intern per Hand, Hubwagen oder Stapler als auch extern per LKW transportiert werden.

Während des Prototypentests wurde geprüft, ob die im Holzwerkstoff eingebetteten Drucksensoren den durch das Einlegen und Entnehmen von Behältern bzw. Baugruppen auftretenden Belastungen standhalten, ihre festgelegte Position beibehalten und dauerhaft korrekt messen. Dabei durften sie den Anwender bei der Handhabung des Transportsystems zu keinem Zeitpunkt stören.

Unterdessen wurden die auftretenden Schwingungen sowie die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Umgebung der Ladungsträger erfasst. Die Temperatur an den Akkus wurde zusätzlich gemessen. Darüber hinaus wurde die Dehnung eines Holzstrukturelements in der fahrbaren Transportplattform aufgezeichnet. Zur Datenerfassung kamen der Messverstärker sowie das Mobilgerät mit entsprechender Software zum Einsatz. Außerdem wurde der Standort eines Ladungsträgers mittels GPS getrackt. Im Rahmen dieser Messungen wurde untersucht, ob und wie ein solches Sensorsystem, welches eigentlich dem Labormaßstab entspricht, nun aber auf den realen Anwendungsfall übertragen wurde, sinnvoll zur Zustandsüberwachung eines Transportsystems in Holzleichtbauweise eingesetzt werden kann. Dabei lag der Fokus ebenfalls auf der Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der Messungen.

Weiterhin wurde die strukturelle Integrität der Holzstrukturen – unter Berücksichtigung der möglichen Schwächung infolge der konstruktiven Funktionalisierung einzelner Strukturelemente – in der realen Betriebsumgebung analysiert. Dabei wurden auch die verwendeten Holzverbindungen, insbesondere Zapfen- und Steckverbindungen mit wenigen Verschraubungen, einer kontinuierlichen Sichtprüfung unterzogen.

## 6 BISHERIGE ERGEBNISSE

Zu Beginn der Testphase wurden herkömmliche, dünn-schichtige, resistive Drucksensoren zur Füllstandsmessung der Standardbehälter eingesetzt. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Sensoren eine hohe Drift aufweisen – eine Veränderung der Ausgangssignale über die Zeit, ohne dass sich die tatsächlichen Messbedingungen ändern. Folglich erwies sich die Messung als unzuverlässig. Aus diesem Grund wurden Polymersensoren, die auf Impedanzmessung basieren, als Alternative gewählt. Sie sollen eine nahezu vernachlässigbare Drift aufweisen. Die Leistungsfähigkeit der Sensoren wurde in einem weiteren Funktionsmuster geprüft und bestätigt. Anschließend wurde der entsprechende Prototyp umgerüstet. Die neuen Polymersensoren wurden testweise in einem Fach des Ladungsträgers integriert. Die Praxistauglichkeit wird derzeit noch untersucht.

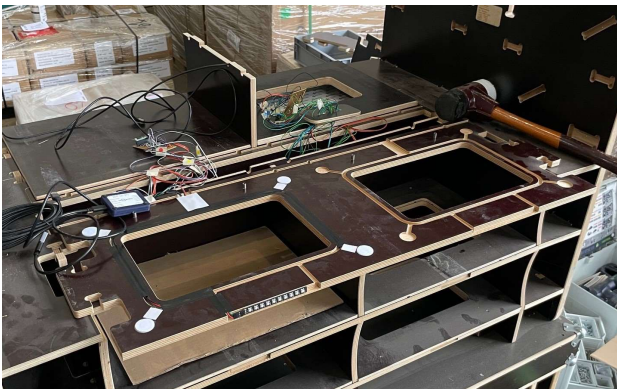


Abbildung 10. Umrüstung des Sonderladungsträgers zur Beförderung von Standardbehältern

Zur Erfassung der An- und Abwesenheit der einzelnen Baugruppen in den Bauteilaufnahmen wurde ebenfalls eine elektrische Druckmessung auf Basis resistiver Kraftsensoren durchgeführt. In diesem Szenario stellte sich die Drift der einfachen Dünnschicht-Kraftsensoren als unerheblich heraus, da es nicht um eine genaue Kraft- bzw. Gewichtserfassung, sondern lediglich um die Detektion eines Objekts ging. Für diesen Anwendungsfall sind die genutzten Sensoren also praktikabel. Ihre Vorteile gegenüber den Polymersensoren sind der günstige Anschaffungspreis, die hohe Verfügbarkeit und die Robustheit. Weiterhin lassen sich die ausgegebenen Signale verhältnismäßig einfach verarbeiten.

Sowohl die Polymersensoren als auch die Dünnschicht-Drucksensoren haben durch die für sie vorgesehenen Aussparungen in den Strukturbauteilen ihre Position während des Feldtest beibehalten. Es wurden keine unzuverlässigen Verschiebungen der Sensoren oder der elektrischen Leitungen festgestellt. Zudem wurde die Primärfunktion der Bauteilaufnahmen bzw. der Transportmodule nicht beeinträchtigt. Eine störungsfreie Handhabung der Ladungsträger ist möglich. Der Ansatz zur Funktionalisierung der Holzstrukturelemente lässt sich daher als geeignet bewerten.

Das sensorische System zur Zustandsüberwachung der Transportmodule und zur Überwachung der Umgebungsbedingungen wird in dieser Form üblicherweise im Laborumfeld eingesetzt. Für das Transportsystem wurde es zur mobilen Nutzung ertüchtigt und in einem Ladungsträger integriert. Um die sensible Verarbeitungstechnik vor den Transportbelastungen zu schützen, wurde sie robust umhaust. Dafür erwies sich die Umhausung zwar als nützlich, die Funktion des Ladungsträgers wurde durch sie jedoch beeinträchtigt. Zum einen geht das Sensorsystem, speziell die elektronischen Bestandteile zur Energieversorgung und Signalverarbeitung, mit einem hohen Platzbedarf einher. Dies verringert den möglichen Füllgrad der Transportmodule. Zum anderen bringt die Umhausung ein verhältnismäßig hohes Gewicht mit sich, was dem Leichtbaugedanken widerstrebt. Weiterhin hat sich gezeigt, dass das Mobilgerät zur Datenerfassung nur bedingt geeignet ist. Daraus lässt sich ableiten, dass zur praxistauglichen Zustandsüberwachung ein speziell auf mobile Anwendungen angepasstes, kleinformatisches und leichtes Sensorsystem erforderlich ist. Zwar bringt das eingesetzte System grundsätzlich die erforderliche Leistung, in der Praxisumgebung kann es sich allerdings nicht bewähren. Das Ziel, die Zustandsüberwachung des Transportsystems in Holzleichtbauweise zu ermöglichen, wurde in diesem ersten Entwicklungsschritt erreicht. Für die Serienanwendung müssen eine Miniaturisierung der Elektronik und eine konkrete Anpassung auf den Einsatzfall des Transportsystems erfolgen. Dabei stehen einerseits die Umgebungsbedingungen wie Klima, Erschütterungen und mechanische Belastungen im Vordergrund. Andererseits sind die Zustände des konkreten Transportgutes wie Position und Gewicht wichtig.

Bei der Prüfung der Holzstruktur sowie der eingesetzten Verbindungen im innerbetrieblichen Bereich sind keine Probleme aufgetreten. Die funktionalisierten Holzelemente haben die Struktur nicht unzulässig geschwächt. Das Transportsystem hält den üblichen Transportbelastungen stand. Auch durch den außerbetrieblichen Transport per LKW hat das System bislang keine Beschädigungen erfahren. Eine ausgiebige Prüfung in diesem Bereich steht allerdings noch aus.

## 7 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Durch die Funktionalisierung der Strukturelemente, die eine Implementierung von sensorischen und elektronischen Bauteilen in die Holzstruktur erlaubt, wird eine Grundlage für die Digitalisierung von logistischen Abläufen mit entsprechenden Transportsystemen geschaffen. Durch deren Einsatz kann potentiell die Effizienz entlang der Lieferkette gesteigert werden.

Die Implementierung von Überwachungstechnologie ermöglicht die Erfassung, Übertragung und Auswertung von Informationen über das Transportsystem und die Transportgüter in Echtzeit. Dadurch sollen sofortige Maßnahmen bei Abweichungen oder Problemen wie Beschädigungen, unerwünschten Positionsänderungen oder ungewöhnlichen Temperaturschwankungen ergriffen werden können.

Eine durchgängige Überwachung gewährleistet zudem eine lückenlose Dokumentation des gesamten Transportprozesses und sorgt so für Transparenz und Nachverfolgbarkeit. Alle Beteiligten, von Logistikdienstleistern bis hin zu Endkunden, können den Standort und Zustand der Transportgüter jederzeit nachvollziehen. Dies soll die Planbarkeit innerhalb der Logistikkette verbessern, Risiken minimieren, das Vertrauen stärken und die Rückverfolgung von Fehlern ermöglichen.

Darüber hinaus liefern die gesammelten Daten wertvolle Einblicke in die Produktivität der Transportprozesse. Unternehmen sollen diese Informationen nutzen können, um Routen, Lagerbestände und Abläufe zu optimieren und eine bessere Ressourcennutzung und Kostensenkung zu erzielen. Die Überwachungsdaten können in umfassendere digitale Plattformen mit Algorithmen zur Optimierung integriert werden. Dadurch sollen sich beispielsweise die Priorisierung von Transporten oder die Verwaltung von Lagerbeständen automatisieren lassen.

Außerdem sollen durch die kontinuierliche Überwachung des Transportsystems frühzeitig Wartungsbedarfe erkannt werden können, bevor es zu Ausfällen kommt. Dies soll ungeplante Stillstandzeiten reduzieren und die Lebensdauer der Transportmittel und Transporthilfsmittel verlängern.

## 8 DANKSAGUNG

Die Entwicklungsarbeit fand im Rahmen des Projektes „SmartERZ – Smart Composites Erzgebirge“ statt. Das Projekt wird durch die Förderinitiative „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) öffentlich gefördert.

Die Autoren danken der Mogatec GmbH und der LiGenium GmbH für die Zusammenarbeit.

## LITERATUR

- [1] M. Geistert und S. Eichhorn, „Projekt LÖST – Leichte, ökologische, smarte Transportsysteme“ in Tagungsband des 21. Holztechnologischen Kolloquiums [18.-19. April 2024, Dresden], Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik, Band 42, 2024, S. 199 – 207.
- [2] M. Geistert und S. Eichhorn, „Projekt LÖST – Leichte, ökologische, smarte Transportsysteme“, Poster zum 21. Holztechnologischen Kolloquium [18.-19. April 2024, Dresden], 2024.

---

**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. Leiter der Forschungsgruppe Anwendungstechnik Erneuerbarer Werkstoffe (AEW).

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

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

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