

Führungsbauteile aus faserverstärkten Kunststoffen in intralogistischen Anwendungen

Guidance-components made of fiber-reinforced plastics in intralogistic applications

Tobias Schöneck¹
Klaus Nendel¹

Herbert Engelen²
Frank Henning²

Kai Furmans³

¹ Professur für Fördertechnik
Technische Universität Chemnitz

² Projektgruppe Funktionsintegrierter Leichtbau
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie

³ Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
Karlsruher Institut für Technologie

In vielen Anwendungen der Intralogistik lassen sich Führungssysteme mit Stützrollen finden, die hohen Belastungen ausgesetzt sind. Hierbei werden oftmals Profilträger aus Stahlwerkstoffen als führende Bauteile eingesetzt. Deren Bewegung erfordert aufgrund der hohen Eigenmassen einen erheblichen Energiebedarf. Im vorliegenden Artikel wird die Entwicklung von derartigen Komponenten aus faserverstärkten Kunststoffen beschrieben. Der Fokus liegt auf der Eintragung hoher Kontaktkräfte in das Bauteil. Es werden die notwendigen Anforderungen dargestellt sowie die Entwicklung eines speziellen Rollenprüfstandes erläutert. Zudem beinhaltet der Artikel die systematische Entwicklung neuer Funktionselemente und die Herleitung einer Methodik zur Untersuchung der Belastbarkeit des faserverstärkten Kunststoffes beim Einwirken einer Rolle als Teilergebnisse des Forschungsvorhabens.

[Schlagworte: Flurförderzeuge, Regalbediengeräte, Faserverstärkter Kunststoff, Pultrusion, Tribologie]

Guidance systems with supporting rollers can be found in many applications in intralogistics that are exposed to high loads. Profiled beams made of steel materials are often used as main components. Their movement requires a significant energy amount because of the high dead load. The present article describes the development of these components made of fiber-reinforced plastics. It focuses the transmission of high contact forces into the beams. Essential requirements are described as well as the development of a purpose-built roller test bench. The article furthermore includes a methodic concept design and the derivation of a test methodology that can be used to analyze material strength under the influence of a roller.

[Keywords: industrial trucks, storage and retrieval systems, fiber reinforced plastic, pultrusion, tribology]

1 EINLEITUNG

In zahlreichen Bereichen der Intralogistik besteht die Anforderung, ausgewählte Baugruppen oder Bauteile innerhalb einer Maschine linear zu bewegen und zu führen, um Güter zielgerichtet fördern zu können. Zu diesen Führungssystemen zählen auch Mast- oder Lastschlittenführungen in Hubgerüsten von Flurförderzeugen, Katzführungen bei Kranen oder Hubwagenführungen bei Regalbediengeräten. In den Profilkammern von eingesetzten Profilträgern als Führungsbauteile bewegen sich zumeist Stützrollen, welche auf einer definierten Lauffläche abrollen. Die standardisierten oder spezifischen Profilträger werden vorrangig aus Stahlwerkstoffen gefertigt, um den erheblichen Kontaktbelastungen zwischen Stützrolle und Lauffläche standhalten zu können. Deren Bewegung durch z. B. das Anheben oder Verfahren von Gütern bedarf aufgrund der hohen Eigenmassen viel Energie.

Durch die Herstellung der Führungsbauteile aus faserverstärkten Kunststoffen ist es möglich, die Eigenmassen signifikant zu senken und die Energieeffizienz erheblich zu steigern. Allerdings muss zunächst die Einleitung der hohen Kontaktkräfte von der Stützrolle in den Profilträger sichergestellt werden. Die Lösung der Aufgabenstellung liegt in der Entwicklung und Untersuchung von höher beanspruchbaren Funktionselementen.

Ein Funktionselement nach Abbildung 1 kann als tribologisches System aus einem Grund- und einem Gegenkörper in Anlehnung an [Czi03] definiert werden. Der Gegenkörper soll hierbei den Führungsbereich eines Führungsbauteiles darstellen. Deren Verbindung kann stoffschlüssig, formschlüssig oder kraftschlüssig sein. Aufgrund des unmittelbaren Kontaktes zwischen Grund- und Gegenkörper erfolgt hierüber die Krafteinleitung in das

Führungsbauteil. Bei Profilträgern aus Stahl ist der Führungsbereich zeitgleich ein Bestandteil des Führungsbau- teiles und somit stoffschlüssig integriert.

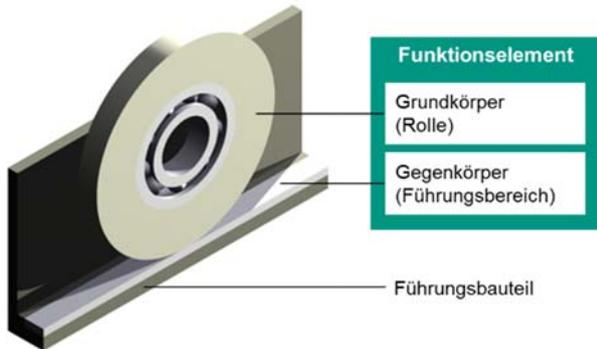


Abbildung 1: Allgemeiner Aufbau eines Funktionselementes

2 ANALYSE VON ANWENDUNGSBEISPIELEN

Die meisten Anwendungen mit relevanten Funktions- elementen für die Entwicklung zählen zu den Unstetigför- derern. Hervorzuheben sind Regalbediengeräte (RBG), Flurförderzeuge (FFZ) und Krane. Als wichtige Beispiele für Funktionselemente können hier der rollengeführte Hub- wagen am Mast eines Regalbediengerätes oder ein rollen- geführter Hubrahmen im Hubgerüst eines Staplers genannt werden (siehe Abbildung 2). Weitere Elemente sind in Ta- belle 1 aufgelistet. Bei Kranen werden zunächst nur Aus- führungen mit vergleichsweise niedrigen Radlasten be- trachtet und aufgezählt. Die Eingrenzung ist zweckmäßig, da derartige Belastungen bei einzelnen Kranarten extrem hohe Werte annehmen können. Eine geringere Bedeutung haben einzelne Funktionselemente aus Stetigförderern wie z. B. Skidförderer oder Elektrohängebahnen, welche an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben sollen.



Abbildung 2: Regalbediengerät (links) [Dam15] und Kommissi- onierstapler (rechts) [Jun15] als relevante Anwendungen in der Intra-logistik

Tabelle 1: Beispiele von Funktionselementen

Anwendung	Ausführung	Funktionselement
Regalbe- diengerät	<ul style="list-style-type: none"> • Ein-Mast-RBG - Kleinteile - Paletten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hubwagenführung • Führung bei telesko- pierbaren Lastaufnah- memitteln
Flurförder- zeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Stapler • Vertikalkom- missionierer • Hochhubwagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hubrahmenführung im Hubgerüst • Lastschlittenführung im Hubgerüst • Führung im Last- schlitten
Krane	<ul style="list-style-type: none"> • Einträger- brückenkran • Portalkran • Säulenkran • Hängekran 	<ul style="list-style-type: none"> • Laufkatzenführung

Um Anforderungen an die Entwicklung neuer Funkti- onselemente definieren zu können, bedarf es einer Analyse ermittelter Beispiele aus Tabelle 1. Im Vordergrund stehen die Belastungen. Für die ausgewählten Paarungen kommen ausschließlich Rollen als Grundkörper zum Einsatz. Mit Hilfe vereinfachter Berechnungsmodelle lassen sich Kon- taktkräfte pro Rolle von rund 5,3 kN für Regalbediengeräte automatischer Kleinteilelager (AKL) bis rund 55 kN für Gegengewichtstapler mit einer Nenntagfähigkeit von 9 t ermitteln. Es ist zu bemerken, dass jede Anwendung durch eine Vielzahl von Varianten über ein weites Spektrum an Kontaktkräften verfügt. In Abbildung 3 werden ausschließ- lich die maximalen Belastungen dargestellt. Im Rahmen der Entwicklung neuer Funktionselemente ist hierdurch eine sinnhafte Einschränkung zu treffen. Bei der Festle- gung einer Obergrenze von 30 kN können ausreichend viele Anwendungen profitieren.

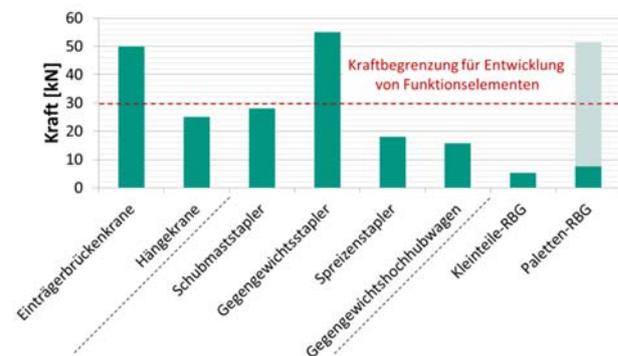


Abbildung 3: Maximale Belastungen pro Rolle in Funktionse- lementen von Unstetigförderern

Neben der Belastung ist die Rollgeschwindigkeit eine wichtige Kenngröße. Bei Hubgerüsten von Flurförderzeu- gen sind Werte von bis zu 0,6 m/s bei maximaler Rollen- belastung recherchierbar. Krane können z. T. bis zu

120 m/min erreichen. Jedoch sind die Geschwindigkeiten in der Praxis häufig niedriger. Hingegen verfügen AKL-Regalbediengeräte über eine hohe Dynamik. Je nach Tragfähigkeit liegen die maximalen Geschwindigkeiten zwischen 2,0 bis 3,5 m/s.

3 ENTWICKLUNG NEUER FUNKTIONSELEMENTE

3.1 ALLGEMEINER ANSATZ

In Bezug auf die Definition eines Funktionselementes stehen beim Einsatz eines faserverstärkten Kunststoffes für Führungsbauteile zwei grundlegende Gestaltungsmöglichkeiten zur Verfügung. Zum einen ist der Führungsbereich durch eine zusätzliche Komponente, z. B. ein Metallleiste, realisierbar, die durch Verkleben oder ein anderes Fügeverfahren mit dem Führungsbauteil verbunden werden kann. Zum anderen lässt sich der Führungsbereich ähnlich zu Profilträgern aus Stahl in den faserverstärkten Kunststoff integrieren. Hierbei rollt der Grundkörper unmittelbar auf dem Material ab. Durch die Möglichkeit der konstruktiven Gestaltung des Faserkunststoffverbundes können Modifikationen im oberflächennahen Bereich hinsichtlich einer Verbesserung der mechanischen und tribologischen Belastbarkeit durchgeführt werden. Hierzu liegen nur begrenzt wissenschaftliche Untersuchungen vor. Ausschließlich im Rahmen der Entwicklung eines Leichtbau-Regalbediengerätes mit der Firma Viastore GmbH sind einzelne Voruntersuchungen mit einer Vulkollanrolle an der TU München auf einem kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff erfolgt. Im späteren Verlauf kamen allerdings Aluminiumbänder als Führungsbereiche zum Einsatz. Bei einer ähnlichen Entwicklung der Firma Gebhardt Fördertechnik GmbH werden bevorzugt Stahlbänder verwendet. [Ert12] [Geb13]

Aufgrund der geringen Datenlage soll der zweite Ansatz weiterverfolgt werden, um zusätzliche Komponenten am Führungsbauteil einzusparen. Die Belastbarkeit des faserverstärkten Kunststoffes kann durch folgende Hauptfaktoren beeinflusst werden:

- Lagenaufbau,
- Faserhalbzeuge,
- Matrixmaterial.

Des Weiteren können ergänzende Additive und Füllstoffe in die Matrix eingebracht werden. Der Aufbau eines sogenannten Laminats lässt sich an einem Beispiel in Abbildung 4 verdeutlichen. Es kommen Rovings, Wirrfasermatten, Geflechte, Gewebe, komplexe Gelege oder Oberflächenvliese als Faserhalbzeuge zum Einsatz. Deren Anordnung und Schichtdicke können weitgehend beliebig sein, sofern ein symmetrischer Aufbau in vertikaler Richtung sichergestellt wird. Für die Halbzeuge stehen unterschiedliche Fasermaterialien mit verschiedenen Feinheiten oder Flächengewichten zur Verfügung. Die Fixierung des Lagenaufbaus erfolgt durch die Matrix. Es ist zu ergänzen,

dass das Laminat ebenso durch das Herstellungsverfahren beeinflusst wird. Insbesondere sind die Prozessparameter und die erreichbaren Faservolumengehalte entscheidend.

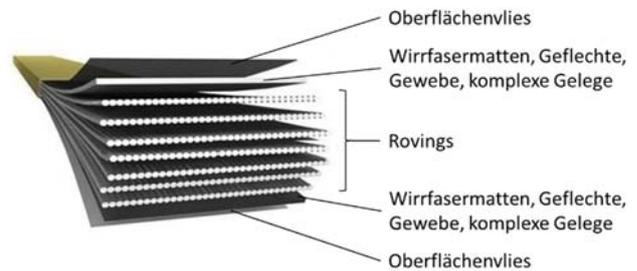


Abbildung 4: Allgemeiner Lagenaufbau eines Laminates

Neben der Belastbarkeit des Materials ist für ein neues Funktionselement ebenso eine günstige Spannungsverteilung im Kontaktbereich beim Einwirken einer Kraft vorteilhaft. Dieses kann u. a. durch die Geometrie des Kontaktes und eine geeignete Materialauswahl des Grundkörpers erreicht werden.

Um Funktionselemente gezielt entwickeln zu können, ist es zweckmäßig, die beschriebenen Einflüsse zunächst näher zu betrachten. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen erläutert.

3.2 BELASTBARKEIT VON FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

Ob ein genereller Einfluss der Faserverstärkung auf die Belastbarkeit des Materials besteht, sollen Druckversuche mit einer Rolle zeigen. Gegenwärtig gibt es keine Normung zu einer derartigen Versuchsdurchführung und –auswertung aufgrund des besonderen Anwendungsfalles.

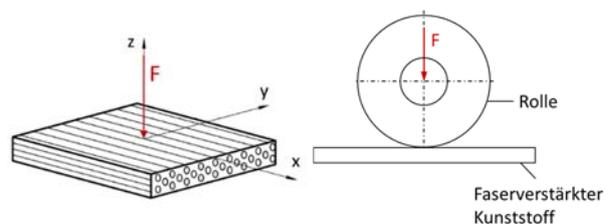


Abbildung 5: Belastung eines anisotropen Materials (links) [ISO14125] durch senkrecht Einwirken einer Rolle (rechts)

Anhand der Abbildung 5 soll ein anwendungsnaher Versuch schematisch verdeutlicht werden. Mittels einer handelsüblichen Stützrolle für Hubgerüste von Flurförderzeugen mit einem Durchmesser von 102,6 mm und einem Ballungsradius von 500 mm erfolgt das Eindringen in verschiedene Laminats. Um einen Vergleich für die Widerstandskraft zu erhalten, ist die Eindringtiefe auf 0,4 mm festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Widerstand richtungsabhängig ist. Bei der Ausrichtung der Rolle in Faserlängsrichtung werden höhere Werte erzielt als in Faserquerrichtung. Die Differenz hängt zudem vom Faserhalbzeug an der Laminatoberfläche ab. Bei rein unidirektionalen Laminaten (UD-

GFK) ist der Unterschied erheblich höher als bei Laminaten mit einer zweidimensionalen Wirrfasermatte im Kontaktbereich zur Rolle. Jedoch ist zu bemerken, dass der Hauptanteil am Widerstand die Matrix hat. Im rechnerischen Vergleich zum reinen Matrixmaterial wird erkennbar, dass die Faserverstärkung einen maximalen Zuwachs von 35% in Faserlängsrichtung bewirkt.

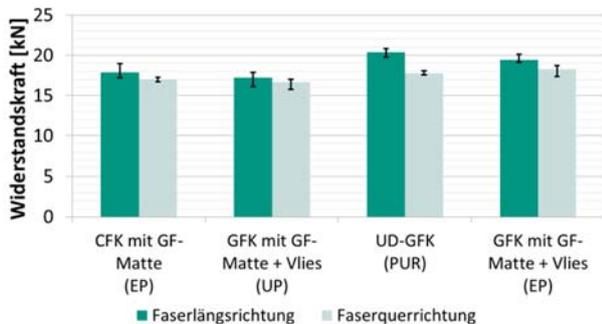


Abbildung 6: Widerstandskräfte beim Eindringen einer Rolle in Abhängigkeit der Faserrichtung

Nach dem Entlasten der Laminat e konnten kaum bleibende Verformungen festgestellt werden. Es waren lediglich Schattierungen einer Ellipse zu erkennen. Um mögliche Schädigungen im Inneren des faserverstärkten Kunststoffes zu prüfen, erfolgte eine vergleichende Untersuchung relevanter Materialkennwerte. Hierzu zählen u. a. der richtungsabhängige E-Modul und die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit. Die Werte lassen sich über genormte 3-Punkt-Biegeversuche bestimmen. In Abbildung 7 ist das Ergebnis der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit in Faserlängsrichtung aufgezeigt. Die Laminat e zeigen keine auffälligen Veränderungen. D. h., dass die Schubspannungen beim Einwirken der Rolle zu keiner Delamination geführt haben. Analog verhalten sich der E-Modul und die Bruchkraft.

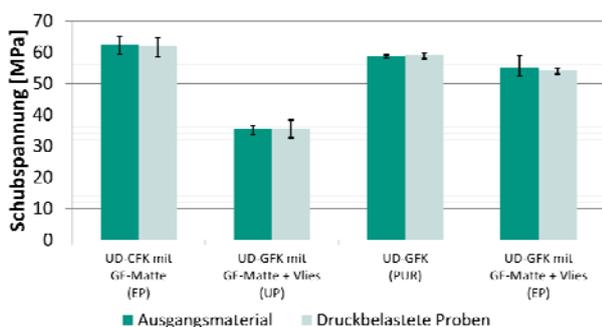


Abbildung 7: Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in Faserlängsrichtung von unbelasteten und druckbelasteten Proben

Weitere Erkenntnisse zum Einfluss auf tribologische Kennwerte wie Verschleißerscheinungen erbrachten einzelne Rollversuche. Hierbei rollten Vulkollan- und Polyamidrollen auf verschiedenen Laminaten ab. Es hat sich gezeigt, dass bei einer Belastung von 1 kN die härtere Polyamidrolle im Kontakt zu unidirektionalen Faserkunst-

stoffverbunden einzelne Ausbrüche aus dem Matrixmaterial generiert. In Abbildung 8 sind Anhaftungen an der Rolle und Ablagerungen auf dem faserverstärkten Kunststoff schon nach $2 \cdot 10^4$ Überrollungen zu erkennen. Hingegen gab es kaum Verschleißerscheinungen bei der gleichen Belastung in Kombination mit Laminaten, welche über ein Oberflächenvlies und eine Wirrfasermatte verfügen. Das Einwirken der Vulkollanrolle führte bei allen Laminaten zu keinen wesentlichen Verschleißerscheinungen. Der Unterschied zur Polyamidrolle kann durch die höhere Materialsteifigkeit und Oberflächenhärte erklärt werden. Bei identischen Kräften werden höhere Pressungen induziert, was schneller zum Verschleiß führen kann.



Abbildung 8: Rollversuche mit einer Polyamidrolle auf einem unidirektionalen CFK (links) mit Ausbrüchen nach rund $2 \cdot 10^4$ Überrollungen (rechts)

3.3 BEANSPRUCHUNGEN IM KONTAKTBEREICH

Bei rollenden Grundkörpern beeinflusst die Geometrie der Lauffläche die Form des Kontaktes. Eine ballige Rolle bewirkt eine Punktberührung, während eine zylindrische Rolle zur Linienberührung führt. Beide Fälle sind in Funktionselementen relevanter Anwendungen im Kontakt zu einem ebenen Führungsbereich auffindbar. Hierbei bewirkt die ballige Rolle infolge des Punktkontaktes die Ausbildung einer elliptischen Kontaktfläche und generell höhere Pressungen gegenüber zylindrischen Rollen mit einer rechteckigen Kontaktfläche bei identischer Belastung. Jedoch verfügen ballige Rollen über eine praktische Relevanz, wodurch eine Substitution durch zylindrische Rollen nicht möglich ist. Um die Beanspruchungen dennoch zu senken, kann eine einfache Optimierung der Kontaktgeometrie vorgenommen werden. Durch das Einbringen einer Rille in den Führungsbereich lassen sich die Spannungen reduzieren, da die Kontaktfläche zunimmt. In Abbildung 9 ist die Hertz'sche Pressung für die unterschiedlichen Kontakte dargestellt. Der vereinfachte Vergleich basiert auf der Annahme einer Kontaktkraft von 15 kN. Der Ballungsradius der Rolle beträgt 500 mm, der Rillenradius -750 mm und die Rollenbreite 50 mm. Die Kontaktkörper sind aus Stahl. Es ist zu erkennen, dass das Einbringen der Rille bei einer Punktberührung eine Reduzierung der Beanspruchungen um 21% bei einem Rollendurchmesser von

100 mm bewirken kann. Zudem ist durch eine Vergrößerung der Rolle eine zusätzliche Senkung möglich. Hingegen weist der Linienkontakt mit einem Zylinder erwartungsgemäß die geringsten Pressungen auf. Zwischen der Punkt- und der Linienberührung ändert sich die prozentuale Differenz durch eine starke Variation der Kraft um maximal 15%. Auch der Rollendurchmesser beeinflusst die Differenz der Pressungen um nur wenige Prozentpunkte.

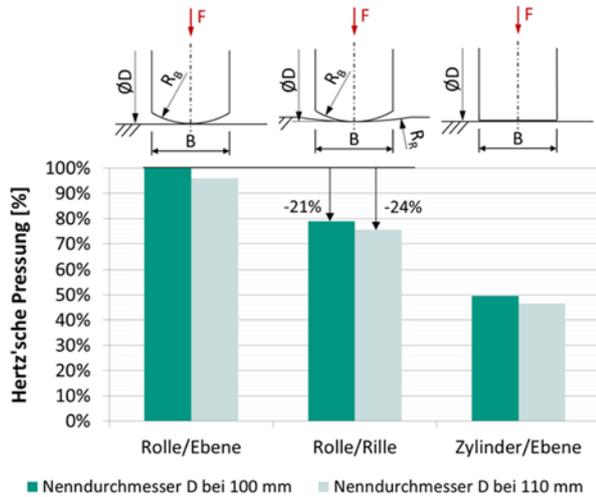


Abbildung 9: Prozentualer Vergleich der Hertz'schen Pressungen für unterschiedliche Kontaktgeometrien

3.4 NEUE FUNKTIONSELEMENTE

Aus den Vorbetrachtungen werden folgende Festlegungen für neue Funktionselemente getroffen:

- Einsatz eines Oberflächenvlieses und einer Wirrfasermatte bzw. einem Gelege im Führungsbereich für erhöhte Verschleißfestigkeit und mögliche Aufnahme geringerer Querkräfte,
- Variation des Oberflächenvlieses,
- Variation des Matrixmaterials,
- Variation der Kontaktgeometrie bei Punktberührung durch Einbringen einer Rille,
- Variation der Rollenwerkstoffe.

Weiterhin sollen alle Faserhalbzeuge mit Ausnahme der Oberflächenvliese aus Glasfasern bestehen. Die Vereinheitlichung soll dazu beitragen, dass zunächst Einflüsse auf die Belastbarkeit wie die Halbzeugart, der Lagenaufbau und das Matrixmaterial umfassend untersucht werden können. In Tabelle 2 sind die einzelnen zu variierenden Materialparameter des faserverstärkten Kunststoffes aufgeführt. Die Lamine sollen als Flachprofile und Profile mit zwei Rillenradien (-750 mm, -1000 mm) hergestellt werden.

Tabelle 2: Variation der Materialparameter des faserverstärkten Kunststoffes

Materialparameter	Parameterwert
Oberflächenvlies	<ul style="list-style-type: none"> • Polyestervlies 39 g/m² • Aramidvlies 34 g/m² • Aramidvlies 60 g/m² • Aramidvlies 120 g/m²
Wirrfasermatte und Gelege	<ul style="list-style-type: none"> • Glasfaser-Wirrfasermatte 450 g/m² • Glasfaser-Komplexgelege 586 g/m²
Rovings	<ul style="list-style-type: none"> • Glasfaserrovings 4800 tex
Matrixmaterial	<ul style="list-style-type: none"> • Epoxidharz (EP) • Ungesättigtes Polyesterharz (UP) • Vinylesterharz (VE)

Als Grundkörper werden anwendungsrelevante Rollen für die Untersuchungen herangezogen. Diese sind in Abbildung 10 aufgezeigt. Die Stahlrolle hat die Abmessungen D105x34 mm und verfügt über einen Ballungsradius von 500 mm. Diese soll auf die flachen und profilierten Lamine abrollen, um den Einfluss der Rille zu bestimmen. Im Vergleich werden zudem bei flachen Profilen unterschiedlich große Vulkollan- und Polyamidrollen eingesetzt. Der Durchmesser variiert bei jeder Art zwischen 143,2 und 179,2 mm bei einer einheitlichen Breite von 50 mm. Als besonderer Grundkörper soll ein Rollenelement mit der Bezeichnung **denirug®** die Untersuchungen ergänzen. Dieses verfügt über eine Vielzahl kleiner und umlaufender Rollen, wodurch ebenso höhere Belastungen übertragen werden können.



Abbildung 10: Anwendungsrelevante Grundkörper für die Untersuchungen mit balliger Stahlrolle, zylindrischen Vulkollan- und Polyamidrollen (oben v.l.) sowie einem denirug®-Kunststoffrollenelement (unten)

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1 METHODISCHER ANSATZ

Um Einflüsse der unterschiedlichen Parameter bezüglich der Belastbarkeit der Lamine zu ermitteln zu können, sind geeignete Prüfverfahren heranzuziehen. Jedoch gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine standardisierten oder empfohlenen Richtlinien zum Ablauf einer Untersuchung oder zur Bewertung einer Schädigung faserverstärkter Kunststoffe hinsichtlich einer Belastung durch das Abrollen eines Rollkörpers. Derartige Krafteinleitungen sind für das Material untypisch und stellen somit einen neuen Untersuchungsschwerpunkt dar. Bisherige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beziehen sich auf isotrope Werkstoffe, welche eine Kontaktpaarung bilden. Hierzu sind Methoden zur Materialprüfung bekannt.

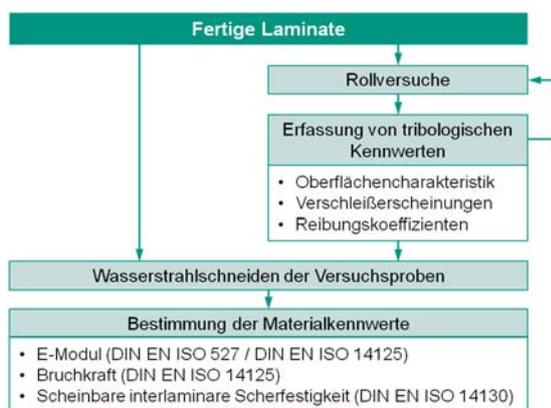


Abbildung 11: Methodik zur Untersuchung faserverstärkter Kunststoffe bei Rollenbelastungen

Der Lösungsansatz zu einem Verfahren zur Beurteilung des Schädigungsgrades faserverstärkter Kunststoffe bei Überrollung basiert auf vergleichende Materialuntersuchungen zwischen unbelasteten und belasteten Versuchsproben nach Abbildung 11. Hierbei werden zunächst aus den hergestellten Laminaten unterschiedliche Proben für standardisierte Materialprüfverfahren zur Ermittlung vom richtungsabhängigen Elastizitätsmodul, der Bruchkraft bei Biegebeanspruchung und der scheinbaren interlaminaeren Scherfestigkeit mittels dem etablierten Wasserstrahlschneiden geschnitten. Parallel werden Rollversuche unter einem Belastungskollektiv durchgeführt. In festgelegten Intervallen sind ergänzend tribologische Kennwerte zu ermitteln. Hierzu zählen die Oberflächencharakteristik, Verschleißerscheinungen und Reibungskoeffizienten. Nach Erreichen einer definierten Lastspielzahl sind aus den Laminaten ebenso die Proben für die Bestimmung der Materialkennwerte zu schneiden und die Untersuchungen durchzuführen. Anschließend erfolgt der Vergleich aller Ergebnisse und die Beurteilung des Schädigungsgrades. Über einen iterativen Prozess können kritische Lastspielzahlen für eine Belastung ermittelt und somit Aussagen zur Standfestigkeit einer Materialpaarung getroffen werden.

4.2 HERSTELLUNG DER LAMINATE

Faserverstärkte Kunststoffe können durch vielzählige Verfahren hergestellt werden. Die Auswahl einer geeigneten Technologie hängt u.a. vom Lagenaufbau, der eingesetzten Faserhalbzeuge, des erreichbaren Faservolumengehaltes, der Bauteilgeometrie und der Kosten ab. Im Rahmen der Fertigung von Führungsbauteilen für die neuen Funktionselemente ist das Pultrusionsverfahren hervorzuheben. Folgende zwei Vorteile lassen sich gegenüber anderen Herstellungsarten nennen:

- kontinuierliche Fertigung,
- hohe Wirtschaftlichkeit.

Hierbei ist zu bemerken, dass ausschließlich konstante Querschnitte erzeugt werden können. Jedoch lassen sich diese nahezu beliebig gestalten. Die Lamine unterliegen dennoch einigen Rahmenbedingungen. Es ist empfehlenswert bei größeren Abmessungen einzelne zweidimensionale Faserhalbzeuge einzubringen, um die Produktstabilität und -qualität zu steigern. Im Falle der Verwendung von Wirrfasermatten oder Gelegen in der äußeren Lage sind bevorzugt Oberflächenvliese als Laminatabschluss einzusetzen, um die Oberflächenqualität zu verbessern.

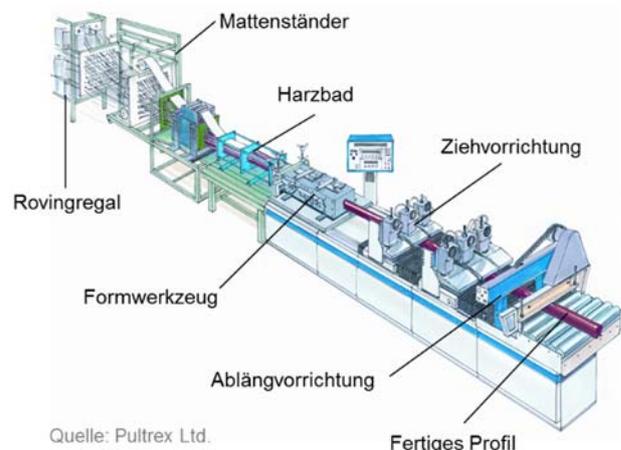


Abbildung 12: Pultrusionsanlage [Pul11]

In Abbildung 12 ist eine Pultrusionsanlage dargestellt. Entsprechend dem gewählten Laminataufbau werden zunächst die Faserhalbzeuge vorbereitet. Hierbei erfolgt die Positionierung der einzelnen Rollen mit Rovings, Wirrfasermatten oder Oberflächenvliese am Anlageneingang mit Hilfe von Regalen und Ständern. Die Halbzeuge werden danach über einzelne Lochplatten in Richtung des Formwerkzeuges gezielt zusammengeführt. Dabei erfolgt die Imprägnierung mit dem Matrixsystem in einem offenen Harzbad oder einer Injektionsbox. Anschließend laufen die Faserhalbzeuge in das Formwerkzeug ein. In Abhängigkeit der eingestellten Verarbeitungstemperatur und des Druckes vernetzen sich die Polymerketten des Matrixmaterials im Werkzeug. Abbildung 13 zeigt das ausgehärtete Laminat

am Werkzeugausgang, welches auch als Pultrudat bezeichnet werden kann. Abschließend erfolgt die Konfektionierung des hergestellten Profils mittels einer Ablängvorrichtung. Die Kontinuität beim Prozess lässt sich durch eine Abziehvorrichtung erreichen. Diese ist nach dem Formwerkzeug angeordnet. Um die beabsichtigten Lamine zu den Funktionselementen fertigen zu können, sind eigens entwickelte und hergestellte Werkzeuge zum Einsatz gekommen.

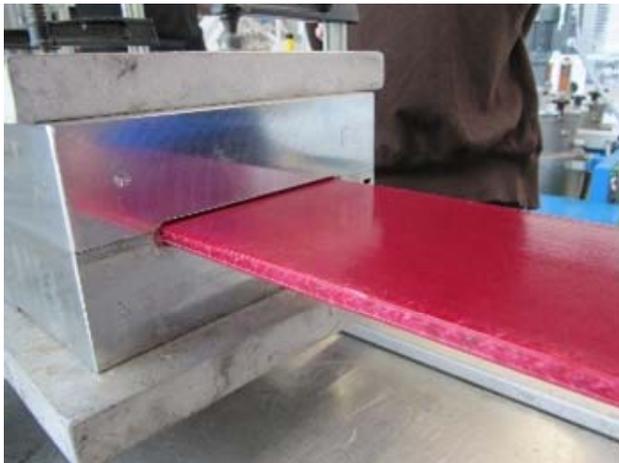


Abbildung 13: Fertiges Pultrudat am Werkzeugausgang

4.3 ENTWICKLUNG EINES ROLLENPRÜFSTANDES

Für die durchzuführenden Rollversuche nach dem methodischen Ansatz zur Prüfung der Funktionselemente wird eine experimentelle Versuchseinrichtung benötigt, welche realitätsnahe Belastungen und Bewegungsvorgänge erzeugen kann. Die konkreten Anforderungen an den Aufbau lassen sich ebenso aus der Analyse der Anwendungsbeispiele nach Kapitel 2 ableiten und definieren. Hierzu zählen u.a. die stufenlose Einstellbarkeit einer Kontaktnormalkraft von bis zu 30 kN und die Umsetzung einer maximalen Rollgeschwindigkeit von 2 m/s. Zudem müssen unterschiedliche Rollen und Pultrudate einfach montierbar sein.

Infolge der Dimensionen ist es zweckmäßig, einen umfassenden Prüfstand zu entwickeln und umzusetzen. Im Rahmen der Konzeption zeigte sich bei Recherchen, dass bewährte Prüfstandskonzepte zumeist auf die Prüfung von Rollen fokussiert sind. Hierzu werden oftmals rotierende Trommeln als Gegenrollen eingesetzt. Diese verfügen über einen deutlich größeren Durchmesser, um eine Ebene annähernd zu simulieren. Der Mindestwert des Durchmesserverhältnisses zwischen Trommel und Prüfrolle beträgt häufig 5:1 [Küh90] [WB11]. Der Vorteil liegt im konstanten Umlauf der Rollen ohne eine Drehrichtungsänderung. Hierbei lassen sich die Belastungen für die Antriebseinheit des Prüfstandes reduzieren und zudem häufige Überrollungen in einer zeitlich kurzen Periode erzielen. Jedoch sind derartige Konzepte ungeeignet zur Prüfung geradlini-

ger Pultrudate. Aus diesem Grund gestaltet es sich notwendig, eine lineare Relativbewegung zwischen dem Rollkörper und dem Pultrudat unter Berücksichtigung eines Reversierbetriebs zu realisieren. Für einen kompakten Prüfstand ist hierbei die Rolle über das fixierte Laminat zu führen. Als konstruktiver Lösungsansatz gilt die Konzeption eines verfahrbaren Schlittens in einem Gestellrahmen. Am Schlitten können die verschiedenen Rollen angebracht werden. Der Antrieb erfolgt über einen Asynchronmotor und einem Zahnriementrieb. Infolge variierender Rollendurchmesser ist eine vertikale und stufenlos einstellbare Zustellvorrichtung in Richtung des Pultrudats vorteilhaft. Diese Funktion lässt sich durch einen Hydraulikzylinder und einem vertikalen Führungssystem realisieren. Hierbei kann der Zylinder zeitgleich die Kontaktnormalkraft erzeugen. Das Pultrudat wird indirekt am Gestellrahmen mittels einer verbindenden Baugruppe angebracht.

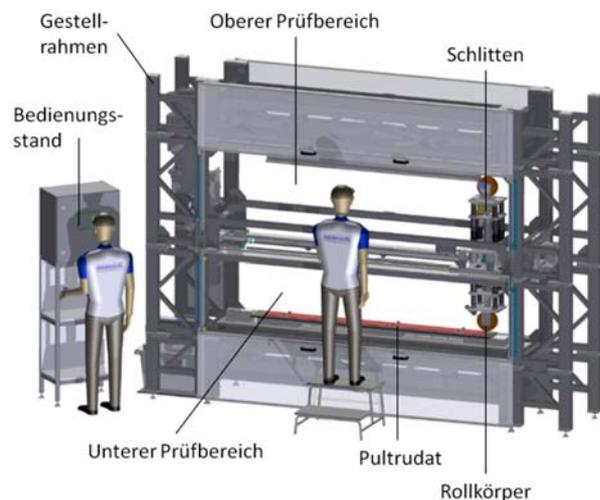


Abbildung 14: CAD-Modell des Rollenprüfstandes

In Abbildung 14 ist die CAD-Konstruktion des Prüfstandes dargestellt. Als Besonderheit kann der symmetrische Aufbau in vertikaler Richtung hervorgehoben werden. Hierdurch entsteht ein unterer und oberer Prüfbereich, wodurch sich zeitgleich zwei Prüfungen mit einem einzelnen verfahrbaren Schlitten durchführen lassen. Die Konstruktion ist derart ausgeführt, dass hohe Beschleunigungen realisiert werden können. In der praktischen Umsetzung bewirken diese das Erreichen der geforderten 2 m/s als Geschwindigkeit. Neben der möglichen Simulation anwendungsnaher Belastungen mit Hilfe verschiedener Fahrprogramme können durch zusätzliche Messvorrichtungen u. a. folgende Größen ermittelt werden:

- Reibkoeffizient der Kontaktpaarung,
- Kontakttemperatur,
- Annäherung der Kontaktkörper (Abplattung).

Durch die ergänzenden Messwerte lässt sich eine Kontaktpaarung tribologisch und energetisch näher charakterisieren und bewerten. In Abbildung 15 ist der untere Prüfbereich mit einem Pultrudat und einer Vulkollanrolle bei ersten Testläufen dargestellt. Der Aufbau unterhalb des Pultrudates stellt einen Messtisch zur Ermittlung der Reibkräfte und -koeffizienten dar. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgt die Inbetriebnahme und Kalibrierung des Prüfstandes in Vorbereitung der Rollversuche.

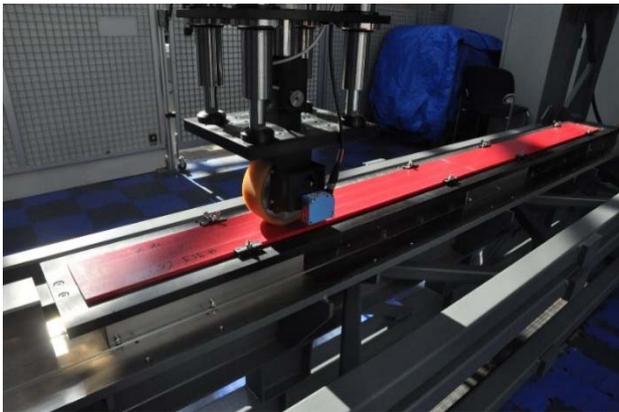


Abbildung 15: Unterer Prüfbereich im Rollenprüfstand

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Um neue Funktionselemente für höhere Beanspruchungen mit Führungsbauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen entwickeln zu können, mussten zunächst relevante Baugruppen intralogistischer Anwendungen definiert und analysiert werden. Hierbei benennt der Artikel konkrete Beispiele wie die Hubrahmenführung in Hubgerüsten von Flurförderzeugen oder die Hubwagenführung im Regalbediengerät. Es zeigt sich, dass die Kontaktkräfte ausgewählter Rollenkontakte zwischen 5,3 kN für Kleinteile-Regalbediengeräte und 55 kN für Stapler variieren können. Jedoch liegen die häufigsten Belastungen bei den verschiedenen Anwendungen und deren vielfältigen Ausführungen unterhalb einer Kraft von 30 kN, welche als Grenzwert für die Entwicklung definiert werden kann.

Die Entwicklung neuer Funktionselemente basiert auf zwei Schwerpunkten. Zum einen ist eine hohe Belastbarkeit des faserverstärkten Kunststoffes zu erzeugen. Zum anderen sind die Beanspruchungen im Kontaktbereich zu untersuchen und möglichst niedrig einzustellen. Beide Maßnahmen werden durch eine Vielzahl von Material- und Geometrieparametern beeinflusst. Durch Voruntersuchungen konnte eine Einschränkung herbeigeführt werden. Diese haben u. a. gezeigt, dass eine höhere Verschleißfestigkeit durch die Verwendung von Oberflächenvliesen und Wirrfasermatten im Kontaktbereich erzielt werden kann. Zudem lassen sich geringe Querkräfte aufnehmen. Somit haben sich aus den Voruntersuchungen bevorzugte Konfigurationen des Laminates ableiten lassen. Hierbei kommen u. a. Polyester- und Aramidvliese sowie

Wirrfasermatten und Gelege mit Glasfasern als Faserhalbzeuge zum Einsatz. Als Matrixmaterialien werden Epoxidharz, ungesättigtes Polyesterharz und Vinylesterharz verwendet. Diese lassen sich mittels dem gewählten Pultrusionsverfahren sehr gut verarbeiten. Die Untersuchung und Bewertung der Verschleiß- und Standfestigkeit der hergestellten Lamine beim Überrollen erfolgt durch eine entwickelte Prüfmethodik. Hierbei werden tribologische Kennwerte und Materialkennwerte, wie z. B. die scheinbare interlaminae Scherfestigkeit, vom Ausgangsmaterial und beanspruchten Material ermittelt und miteinander verglichen. Für die Versuche kommt ein neu entwickelter Prüfstand zum Einsatz. Hierbei lassen sich zeitgleich zwei Prüfungen durchführen sowie Kontaktkräfte bis 30 kN und Rollgeschwindigkeiten bis 2 m/s stufenlos einstellen.

Nach der Inbetriebnahme und Kalibrierung der Messvorrichtungen folgen die umfangreichen Versuche zur Bewertung der einzelnen Einflüsse (z. B. Lagenaufbau, Faserhalbzeug, Matrix etc.) auf die Belastbarkeit der Funktionselemente. Diese Erkenntnisse ermöglichen die Zusammenstellung spezieller Konfigurationen für niedrige, mittlere und hohe Beanspruchungen. Daraus lassen sich konstruktive Empfehlungen für intralogistische Anwendungen beim Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen für Führungsbauteile formulieren.

6 FÖRDERHINWEIS

Diese Veröffentlichung erfolgt im Rahmen des IGF-Vorhabens 17542/BG zum Thema „FVW-Funktionselemente“ der Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Förder-technik und Logistiksysteme e.V. Es wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [Czi03] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch. Reibung und Verschleiß. 2.*, überarbeitete und erweiterte Auflage. Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2003. – ISBN 978-3-528-16354-9
- [Dam15] Dambach Lagersysteme GmbH: *Ganggebundenes Regalbediengerät der MONO-Baureihe*. Produktportfolio. Homepage des Unternehmens (www.dambach-lagersysteme.de), Birschweiler, 2015.

- [Ert12] Ertl, R.: *Energieeffiziente Intralogistik auf Geräteebene – Beispiel Regalbediengerät*. Tagungsband der 17. Magdeburger Logistiktage - Sichere und nachhaltige Logistik. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, 2012. – urn:nbn:de:0011-n-2055638
- [Geb13] Gebhardt Fördertechnik GmbH: *CHEETAH Regalbediengerät in energiesparender Leichtbauweise*. Produktbroschüre Automatisierte Lagertechnik – Made by GEBHARDT. Homepage des Unternehmens (www.gebhardt-foerdertechnik.de), Sinsheim, 2013.
- [ISO14125] Norm DIN EN ISO 14125:2011: *Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [Jun15] Jungheinrich AG: *Kommissionierstapler der Baureihe EKX 513/515k/515*. Produktportfolio. Homepage des Unternehmens (www.jungheinrich.de), Hamburg, 2015.
- [Küh90] Kühlken, B.: *Mechanisches und thermisches Verhalten von Kunststofffrädern in Abhängigkeit der Normalkraft und Rollgeschwindigkeit*. Dissertation. TU Berlin. VDI Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [Pul11] Pultrex Ltd.: *Pultrusion Process for composite materials*. Product Data of Pultrusion Machinery. Homepage des Unternehmens (www.pultrex.com), Manningtree, 2011.
- [WB11] Wehking, K.-H.; Bruns, R. (Hrsg.): *InnoRad – Erhöhung der Lebensdauer von Rädern und Rollen aus Polyurethan*. Abschlussbericht. Stuttgart, Hamburg 2011.
- Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel**, Director, Professorship of Material Handling and Conveying Engineering, Chemnitz University of Technology.
- Dipl.-Ing. Herbert Engelen**, Scientific Assistant, Project Group Functional Lightweight Design, Fraunhofer-Institute for Chemical Technology.
- Prof. Dr.-Ing. Frank Henning**, Head of the Group, Project Group Functional Lightweight Design, Fraunhofer-Institute for Chemical Technology.
- Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans**, Director, Institute for Material Handling and Logistics, Karlsruhe Institute for Technology.
- Dokumentenänderung durch die Autoren am 27.09.2016: Ergänzung des notwendigen Förderhinweises (s. Kap. 6). Verknüpfung der Autoren mit den zugehörigen Institutionen über Ziffern.

Dipl.-Ing. Tobias Schöneck, Scientific Assistant, Professorship of Material Handling and Conveying Engineering, Chemnitz University of Technology. Tobias Schöneck was born 1983 in Schlema, Germany. Between 2003 and 2009 he studied mechanical engineering at the Chemnitz University of Technology. His major subjects were mechanical design and material science.

Address: Professorship of Material Handling and Conveying Engineering, Chemnitz University of Technology, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Germany. Phone: +49 371 531-37798, Fax: +49 371 531-837798, E-Mail: tobias.schoeneck@mb.tu-chemnitz.de