

# Intelligente Hochleistungsförderkette aus Kunststoff

Smart high performance conveyor chain made of plastics

**Clemens Rohne**  
**Andreas Merkel**  
**Michael Schreiter**  
**Jens Sumpf**  
**Klaus Nendel**  
**Egon Müller**  
**Lothar Kroll**

*Professur Fördertechnik (Institut für Fördertechnik und Kunststoffe (IFK)),*

*Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb (Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme (IBF)),*

*Professur Strukturleichtbau / Kunststoffverarbeitung (Institut für Strukturleichtbau (IST))*

*der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz*

**K**urzbeschreibung: Im folgenden Beitrag wird die Entwicklung einer metallverstärkten Kunststoffgleitkette mit integrierter Sensorik skizziert. Der Focus der Arbeit liegt unter anderem auf Untersuchungen zum Werkstoffverbundverhalten zwischen Metall und Kunststoff, der Adaptierung von Mikroelektronik in einzelne Kettenglieder, einer großserientauglichen Fertigungstechnologie für hybride Leichtbaukomponenten, sowie die Erarbeitung von Gestaltungsgrundsätzen und Logistikkonzepten für die Produktion von Leichtbaukomponenten mittels fusionierter Prozesse.

*[Schlüsselwörter: Kunststoffgleitketten, Hybridleichtbau, fusionierte Prozesse, intelligente Logistik]*

**A**bstract: The following abstract deals with the development of metal reinforced plastic slide chains with integrated sensor systems. The research focuses on the material behavior and adhesion between metal and plastics, adaption of micro electric devices on single chain links, large scale production for hybrid and lightweight parts as well as the formulation of design principles and logistics concepts for manufacturing of lightweight devices with merged processes.

*[Keywords: plastic slide chain, lightweight/hybrid design, merged manufacturing processes, smart logistics]*

## 1 AUSGANGSSITUATION

Für den innerbetrieblichen Transport von Stückgütern sind raumbewegliche Kettenfördersysteme, bei denen die Kette als Zug- und Tragorgan auf Führungsschienen gleitet Stand der Technik. Dabei kommen in zunehmendem Maße schmierungsfrei zu betreibende

Kunststoffketten zum Einsatz, deren Verwendung gegenüber den ebenfalls noch oft benutzten Stahlketten viele materialspezifische Vorteile bietet. Geringes Gewicht, gutes Geräuschdämpfungsvermögen, günstige Gleiteigenschaften, hohe Korrosions- und Medienbeständigkeit sowie die Möglichkeit der Massenproduktion durch das thermoplastische Spritzgießen stellen unmittelbare Vorteile gegenüber metallischen Ketten dar. Zudem können mit Hilfe dieser raumbeweglichen Ketten problemlos komplexe Fördersysteme gestaltet werden, was eine hohe Anpassungsfähigkeit der Streckenführung an die Kundenwünsche garantiert.

Trotz dieser vorteilhaften Anwendungsmöglichkeiten stehen die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Steifigkeit und Dauerfestigkeit, deutlich hinter denen der Stahlketten zurück. Die unmittelbare Folge sind teilweise signifikante Einschränkungen in der Transportleistung, der Gestaltungsflexibilität sowie die Gefahr des Ausfalls der Anlagen durch Kettenbruch.

Es sind somit Möglichkeiten zu schaffen, die mechanischen Eigenschaften deutlich zu verbessern und damit den Zugang der Kunststoffketten zu Anwendungsgebieten zu ermöglichen, bei denen derzeit noch geschmierte Stahlketten zum Einsatz kommen. Gleichmaßen müssen jedoch hervorragende Reibungs- und Verschleißigenschaften der tribologisch relevanten Kontaktbereiche der Kette zu Führungsschienen, Antriebsrädern und anderen Bauteilen sowie in den Kettengelenken gewährleistet werden, da dies für den energieeffizienten Betrieb, die Funktionssicherheit sowie Minimierung des Wartungs- und Austauschaufwandes der Förderanlagen zwingend erforderlich ist.

## 2 ZIELSTELLUNG

Um die Vorteile von Metall und Kunststoff ausnutzen zu können, wird im Rahmen des Bundesexzellenzclusters EXC 1075 „Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen“ ein anwendungsbezogener Demonstrator einer Förderkette (Conveyor Complex CCX) entwickelt (siehe Abbildung 1), in der metallische Einleger als Verstärkungselemente mit einem tribologisch optimierten Kunststoffmaterial ummantelt werden. Zusätzlich ist angedacht, dass während des Fertigungsprozesses mikroelektronische Bauteile und Sensorik implementiert werden, um Mess- und Überwachungsaufgaben zu integrieren und Logistikprozesse während des Transportvorgangs zu steuern („intelligente Fördersysteme“).

Das Ziel des Teilprojekts C2 des Exzellenzclusters „MERGE“ ist es, die Fertigungstechnologien von Metall-druckguss und Kunststoffspritzguss zu kombinieren und diese Technologie (insbesondere die Logistikplanung und Fertigungssteuerung) hocheffizient und großserientauglich zu gestalten. Dabei besteht insbesondere die Herausforderung bei der Erstellung von Konzepten zur Materialbereitstellung und Fertigungsplanung/-steuerung bezüglich der Kombination unterschiedlicher Technologien mit unterschiedlichen Reifegraden und variablen Anforderungen (Simultaneous Engineering). Schließlich soll ein Bewertungsmodell entwickelt werden, um den Nachweis verschiedener logistischer Parameter (Leistungsfähigkeit, Flexibilität, Robustheit) von hybriden Prozessen abzusichern. Die Ermittlung eines Gesamtoptimums der technologischen Prozesse ist für die zukünftige Serienfertigung von „intelligenten Fördersystemen“ von oberster Priorität.

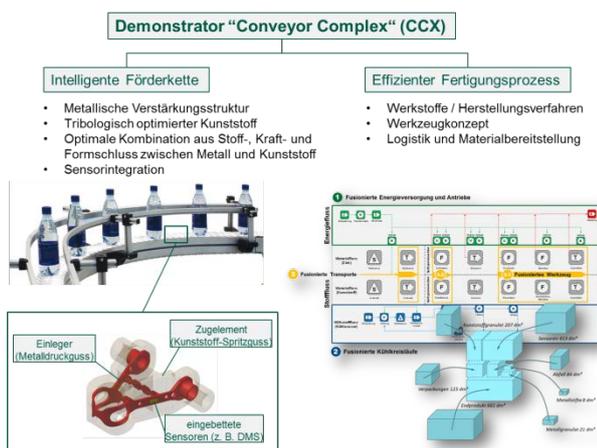


Abbildung 1. Demonstrator Conveyor Complex

## 3 INTELLIGENTE FÖRDERKETTE

Für die Umsetzung eines Kunststoffkettengliedes mit einer metallischen Verstärkungsstruktur sind die Haftungseigenschaften zwischen Metalleinleger und der angespritzten Kunststoffkomponente von zentraler Bedeu-

tung. Untersuchungen von unterschiedlichen Metallen und thermoplastischen Kunststoffen im Hinblick auf ihre Haftungskompatibilität sowie auf ihr Verarbeitungsverhalten und die Übertragbarkeit auf das Referenzbauteil Kettenglied waren deshalb zwingend erforderlich. Ein weiterer wesentlicher Arbeitspunkt war die Entwicklung eines geeigneten numerischen Berechnungsmodells zur Abbildung des Grenzflächenverhaltens zwischen Metall und Kunststoff, um die konstruktive Gestaltung einer geeigneten Einlegerstruktur für das Kettenglied unter mechanischen und fertigungstechnischen Gesichtspunkten optimieren zu können.

In einem ersten Schritt wurden geeignete Werkstoffpaarungen ausgewählt, die sich aus den allgemeinen Anforderungen an ein Kunststoffkettenglied ergeben. Im Hinblick auf die vergleichsweise einfache und großserientaugliche Herstellung geometrisch komplexer Geometrien im Druckgussprozess liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf den Werkstoffen Zink und Aluminium.

### 3.1 METALLISCHE VERSTÄRKUNGSSTRUKTUR

Hinsichtlich des Leichtbaugedankens ist eine Aluminiumlegierung (Dichte = 2,7 g/cm<sup>3</sup>) einer Zinklegierung (Dichte = 6,6 g/cm<sup>3</sup>) vorzuziehen. Erste überschlägige Berechnungen haben ergeben, dass beim Einsatz einer Aluminiumverstärkungsstruktur mit einem Mehrgewicht von ca. 8% im Vergleich zur Vollkunststoffvariante eines Kettengliedes zu rechnen ist. Würde die Verstärkungsstruktur aus einer Zinklegierung gefertigt, dann erhöht sich das Eigengewicht jedes einzelnen Kettengliedes um ca. 29% und führt somit zu einem drastischen Anstieg des gesamten Kettengewichtes. Dies bedeutet folglich einen erhöhten Energieeinsatz beim Betrieb des Fördersystems und entspricht nicht dem Leitgedanken des Exzellenzclusters.

Tabelle 1. Prozentuales Mehrgewicht eines Kunststoffkettengliedes durch Metalleinleger

Werkstoffpaarung	POM	PBT
Aluminiumeinleger	6	8
Zinkeinleger	26	29

Als ein weiterer wichtiger Punkt, welcher bei den Voruntersuchungen zu beachten war, stellte sich die Beziehung von Zugfestigkeit bzw. E-Modul zu Dichte heraus. Diese Beziehungen werden als sogenannte spezifische Festigkeit respektive spezifischer E-Modul bezeichnet. Sie geben Auskunft darüber, in wie weit ein Bauteil bei vorgegebenem Bauraum/ vorgegebener Maße die bessere Festigkeit bzw. bessere elastische Eigenschaften besitzt. Auch hier bietet eine Einlegerstruktur aus Aluminiumdruckguss ein deutlich besseres Verhalten als Einleger aus einer Zinkdruckgusslegierung.

Tabelle 2. Vergleich der Werkstoffe

	Werkstoff für Verstärkungsstruktur		Kettenwerkstoff
	ZnAl4	AlSi10Mg	PBT Arnite T06 202
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	6,6	2,7	1,3
Streckgrenze [MPa]	268	140	55
Zugfestigkeit [MPa]	308	240	45
Elastizitätsmodul [GPa]	96	70	2,7
therm. Ausdehnungskoeffizient [1/K]	27,4*10 <sup>-6</sup>	23*10 <sup>-6</sup>	0,9*10 <sup>-4</sup>
spez. Festigkeit (Zugfestigkeit/Dichte)	47	89	35
spez. Steifigkeit (E-Modul/Dichte)	15	26	2

Aus produktionstechnischer Sicht ist der Energie-, Anlagen- und Materialaufwand kritisch zu betrachten, da Al- und Zn-Legierungen unterschiedliche Schmelztemperaturen und unterschiedliche gießtechnologische Eigenschaften aufweisen. Hier gilt es herauszufinden, ob die Vorteile der Aluminiumvariante des Einlegers auch unter dem fertigungstechnischen Fokus standhalten, oder ob trotz des erhöhten Gewichts und der geringen spezifischen Eigenschaften die Zinkdruckgussvariante den Vorzug als Verstärkung des Kettengliedes erhält.

Das Verhalten der Einlegerwerkstoffe unter korrosiver Beanspruchung ist ebenfalls von großem Interesse bei der Werkstoffauswahl. Es ist bekannt, dass sowohl Aluminium als auch Zink Schutzschichten ausbilden, welche den Grundwerkstoff vor Korrosion schützen. Diese sind jedoch nur unter bestimmten Atmosphären beständig. Die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht zeigt ihre beste Schutzwirkung bei pH-Werten zwischen 4,5 und 8,5, während die optimale Schutzwirkung einer Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>6</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-Schicht im pH-Bereich von 7 bis 12,5 liegt. Kommt es allerdings zum Kontakt mit Medien außerhalb der genannten Bereiche, dann erfolgt ein Auflösen der Schutzschichten. Ferner ist zu erwähnen, dass Aluminium und Zink nach der elektrochemischen Spannungsreihe unedler sind als Eisen, was allerdings laut Literatur nicht kritisch zu betrachten ist, da der Potentialunterschied nicht ausreichend groß ist, um Kontaktkorrosion hervorzurufen [ZIN82, Roe14]. Im Falle des Einsatzes von Hochleistungsförderketten in der Lebensmittelindustrie (Einsatz von chemischen Reinigungsmitteln) und bei der Montage der einzelnen Kettenglieder mittels Edelstahlbolzen sind die erwähnten Hinweise dennoch zu beachten.

### 3.2 TRIBOLOGISCH OPTIMIERTER KUNSTSTOFF

Die für Kunststoffgleitketten eingesetzten Werkstoffe sind vornehmlich Polyoxymethylen (POM) und Polybutylenterephthalat (PBT). Für viele technische Anwendungen kommt Polyamid (PA) zum Einsatz, das jedoch aufgrund der hohen Feuchtigkeitsaufnahme und der damit verbundenen Eigenschaftsminderung für einen Einsatz als Kettenwerkstoff ausscheidet. PBT ist hingegen weniger feuchteempfindlich und zeichnet sich im Bereich der technischen Kunststoffe durch gute Verarbeitungseigenschaften aus. Für den Anwendungsfall Kunststoffgleitketten ist es darüber hinaus besonders wegen seiner guten tribologischen Eigenschaften geeignet. POM ist im Bereich der Gleitketten ebenfalls besonders interessant, da sich im Zusammenspiel mit den Gleitschienen der Führungsprofile nur minimale Reibungseffekte einstellen.

Folglich ist der Verschleiß am Gesamtsystem sehr gering und die Wartungsintervalle können verlängert werden. Weiterhin wird dadurch die vom Antriebsmotor zu Verfügung zu stellende Leistung zur Überwindung des Reibwiderstandes reduziert. Der große Nachteil von POM ist sein unpolares Werkstoffverhalten, welches sich in einer fast unmöglichen stofflichen Anbindung von POM an sich selbst bzw. an andere Werkstoffe widerspiegelt. Für das beschriebene Projekt ist das Anbindungsverhalten des Kettenwerkstoffes zum Einlegerwerkstoff aber von höchster Wichtigkeit, um darüber den Kraftfluss innerhalb des Zugelements realisieren zu können.

### 3.3 OPTIMALE KOMBINATION AUS STOFF-, KRAFT- UND FORMSCHLUSS ZWISCHEN METALL UND KUNSTSTOFF

Die Haftungseigenschaften zwischen Kunststoff und Metall wurden zunächst an geometrisch einfachen Zugscherprobekörpern in Anlehnung an DIN EN ISO 1465 untersucht. In einer ersten Versuchsreihe wurden an Zinkprobekörper, die in einem speziellen Werkzeugsystem im Druckgussverfahren hergestellt wurden, die kettenrelevanten Kunststoffe POM und PBT angespritzt (siehe Abbildung 2). Neben unbehandelten, glatten Oberflächen wurden darüber hinaus im Bereich des angespritzten Kunststoffes verschiedene chemische Haftvermittler eingesetzt und an der Zinkoberfläche unterschiedliche Oberflächenrauheiten (entspr. [VDI 3400]) eingebracht. In Abbildung 2 wird weiterhin deutlich, dass sich der Haftvermittler während des Spritzgussprozesses vom Metalleinleger gelöst hat und nun zum Großteil an der Kunststoffkomponente anhaftet. Das lässt auf eine unzureichende Haftwirkung des Haftvermittlers auf dem Metall und ein temperatursensibles Verhalten schließen.



Abbildung 2. Zugscherproben nach der Zugscherprüfung, rechts Zinkdruckguss mit aufgebrachtem Haftvermittler (blau), links PBT mit anhaftendem Haftvermittler

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Zugscherprüfung am Beispiel der Materialkombination Zink mit PBT dargestellt, anhand derer für diese Materialpaarung geeignete Haftvermittler identifiziert werden konnten. Die Haftungseigenschaften werden darüber hinaus im Wesentlichen durch die Beschaffenheit der Metallprobenoberfläche im Grenzflächenbereich beeinflusst. Eine gröbere Oberflächenstruktur begünstigt dabei aufgrund des höheren Formschlussanteiles die Anhaftung des Kunststoffes.

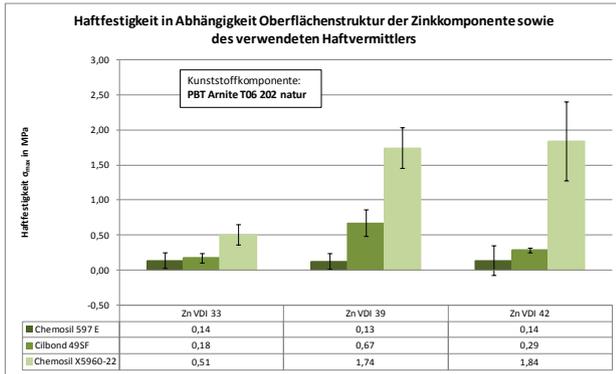


Abbildung 3. Ergebnisse der Zugscherprüfung

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein FE-Modell der Zugscherprobengeometrie erarbeitet, um das reale Versagensverhalten, welches in der Grenzschicht Metall-Kunststoff auftritt, numerisch abbilden und diese Erkenntnisse im weiteren Vorgehen auf ein Kettenmodell übertragen zu können. Die Grenzfläche der in den Versuchen verwendeten Zugscherprobe wurde dabei mittels der „Cohesive-Zone-Model“-Kontaktdefinition in Ansys Workbench modelliert (siehe Abbildung 4). Mithilfe dieses bilinearen Energieansatzes können unterschiedliche Versagensmodi (reine Zugbeanspruchung = Mode 1, reine Scherbeanspruchung = Mode 2, kombinierte Beanspruchung = Mode 3) in den Grenzflächenbereichen abgebildet werden. Für die numerische Analyse der Zugscherprobe wird reine Scherbeanspruchung als Versagensmodus angenommen, da die zugbeanspruchte Grenzfläche aufgrund geometrischer Aspekte vernachlässigbar klein ist. Für das spätere Kettenglied-Einleger-Modell müssen optimaler Weise alle drei Versagensmodi genutzt werden, um die reale Beanspruchung im Bauteil so gut wie möglich abzubilden.

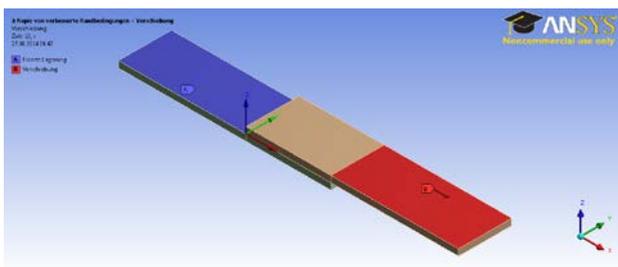


Abbildung 4. FE-Modell der Zugscherprobe mit Randbedingungen

Das Modell liefert u. a. bezüglich der Ausbildung der Versagensfront sehr gute Ergebnisse. Mit zunehmender Verschiebung der Kunststoffkomponente baut sich in der Cohesive-Zone vom rechten Rand beginnend eine Scherspannung auf, die bei Überschreitung eines vorgegebenen Wertes den Kontakt „auflöst“ (siehe Abbildung 5). Der für diese Berechnung genutzte kritische Scherspannungswert wurde aus den Ergebnissen der Zugscherprüfung ermittelt und beträgt  $\tau_s = 0,6 \text{ MPa}$ .

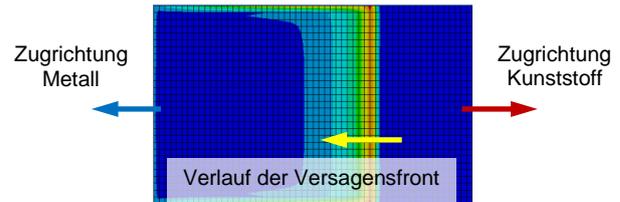


Abbildung 5. Cohesive-Zone mit Versagensfront

### 3.4 SENSORINTEGRATION

Die Integration von Sensoren und Mikroelektronik in die Förderkette bietet die Möglichkeit der Verlagerung von Produktionsprozessen auf die Förderstrecke. Diese können beispielsweise Aufgaben der Qualitätskontrolle (Überwachung von Füllmengen, Gewichten etc.) oder Reife-, Kühl- und Trocknungsprozesse sein. Zudem bietet sich die Möglichkeit der Prozessüberwachung und Aufnahme von Prozessgrößen (Durchlaufzeiten, Verweilzeiten). Aktive Förderketten können zudem zu einer schlanken und energieeffizienten Prozesssteuerung (bspw. Anpassen der Fördergeschwindigkeit oder Abschalten der Förderstrecke bei Leerlauf) beitragen. Auch die Prozessstabilität kann durch die Überwachung der Fördereinrichtung positiv beeinflusst werden.

Aus Sicht der Fabrik- und Logistikplanung müssen die integrierten Sensoren mindestens die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Standardisierung: Um die Sensoren in beliebige Systeme integrieren zu können (Kommunikation über Standardprotokolle).
- Echtzeit: Viele Kennwerte der Prozessüberwachung können nur so sinnvoll genutzt werden.
- Datenspeicherung: zur Auswertung von Langzeitdaten.
- Skalierbarkeit: hinsichtlich Sensoranzahl und Größe des Messwertbereiches.
- Informationssicherheit: zur Sicherstellung der Messdatengenauigkeit, Bereitstellung von ausreichend Datenredundanz, um die durchgängige Bereitstellung der Daten auch bei Ausfall sicherzustellen.

Tabelle 3. Anforderungsprofil und Eigenschaften ausgewählter Sensoren

Aktives Element	Drucksensitive Tragplatte	Aktives Zugelement
Sensor	Druckkraftsensor	Zugkraftsensor
Messwert	Gewicht und Lage des Förderguts	Zugkraft innerhalb der Förderkette
Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identifikation von Fördergütern</li> <li>▪ Vermeidung von Konflikten (falsche Lage des Förderguts, Kippgefahr)</li> <li>▪ Überwachung des Förderguts (Masse, Füllstand)</li> <li>▪ Überwachung der Kapazität der Förderstrecke (Vermeidung von Überbelastung, Leerfahrten etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erhöhung der Funktionssicherheit der Kette (Schutz vor Überbelastung)</li> <li>▪ Bestimmung von Wartungs- und Wechselintervallen</li> <li>▪ Überwachung des fehlerfreien Betriebs (z.B. fehlende Schmierung)</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bereitstellung verschiedener Funktionen durch einen Sensor</li> <li>▪ Kontinuierliche Messwertaufnahme</li> <li>▪ Erfassung von Daten in situ</li> <li>▪ Hohe Genauigkeit der Messwerte</li> <li>▪ Engmaschige Überwachung der Förderanlage und der Fördergüter</li> </ul>	
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufwendige technische Umsetzung</li> <li>▪ Hohe Kosten bei Ausstattung aller Kettenglieder</li> </ul>	

Für die drucksensitive Tragplatte soll ein Drucksensor (bspw. Piezo-Element) in die Tragplatte integriert werden. Dadurch ist es möglich, das Vorhandensein, das Gewicht und die Lage eines Förderguts zu bestimmen. Diese Daten können einerseits der Identifikation von Fördergütern (über das Gewicht) und andererseits der Überwachung der Fördergüter (Gewicht, Vollständigkeit, Füllstand) dienen. Durch die Bestimmung der Lage bzw. des Schwerpunkts eines Förderguts können Konflikte durch Verrutschen, Kippen oder falsche Ausrichtung/ Lage vermieden werden. Die Summe aller zu einem Zeitpunkt auf der Förderstrecke befindlichen Lasten gibt Aufschluss über die Auslastung und ggf. Überbelastung der Förderanlage. Für diese Anwendungsfälle ist es notwendig, je nach Art der Fördergüter jedes Kettenglied bzw. Kettenglieder mit geringem Abstand mit Sensoren zu bestücken.

Das Einbringen von Zugkraftsensoren in die Zugelemente der Förderkette dient nicht der Überwachung der Fördergüter sondern der Förderanlage selbst. Durch einzelne, in größeren Abständen integrierte Sensoren können somit kontinuierlich Daten über die Zugkraft und somit über die Belastung der Kette aufgenommen werden. Dies ermöglicht eine genaue, anwendungsbezogene und sichere Bestimmung der Ablegereife einer Förderkette. Dadurch ist zu erwarten, dass die durchschnittliche Nutzungsdauer einer Kette steigt, da geringere Sicherheitszuschläge bei der Bestimmung der Ablegereife eingehalten werden müssen. Zudem können durch die Zugkraftsensoren Überbelastungen der Förderkette erkannt und ggf. Schutzfunktionen (Abschalten der Förderanlage) ausgeführt werden. Eine Verschlechterung der Reibeigenschaften in den Gleitstellen (Kettenglied – Gleitschiene) bildet sich

ebenfalls in diesem Messwert ab, wodurch ein Wartungsbedarf identifiziert werden kann, bevor er sich durch einen Materialabtrag innerhalb der Gleitstelle (Verschleiß) bemerkbar macht. Es wurde sich letztlich beim ersten Prototyp für den Zugkraftsensor entschieden.

### 3.5 KETTENDESIGN/ENTWICKLUNG

Bezüglich des angestrebten Demonstrator-Fördersystems CCX wurden erste Entwürfe des Kettengliedes erstellt (siehe Abbildung 6.), welche die in den Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse beinhalten, insbesondere die Notwendigkeit eines Formschlusses zwischen Metall- und Kunststoffkomponente, da der Stoffschluss nur für eine geringfügige Kraftübertragung sorgt. Als Vorbild für die neue Kettengliedengeometrie wurde eine handelsübliche zweiteilige Variante bestehend aus Zugelement und Tragplatte gewählt. Die Schwierigkeit bei der Konstruktion und Auslegung der Kette liegt in den beschränkenden Randbedingungen, welche durch das Fördersystem vorgegeben sind, d.h. Kettenräder, Führungsprofile, Bogenräder, usw. Diese Restriktionen lassen keinen großen Raum für komplexe neue Konstruktionsvarianten. Vielmehr sind kleine aber entscheidende Veränderungen vorzusehen, um die Kette in bestehende Layouts zu integrieren und dennoch Platz für den Einleger und die gewünschte Mikroelektronik zu schaffen.

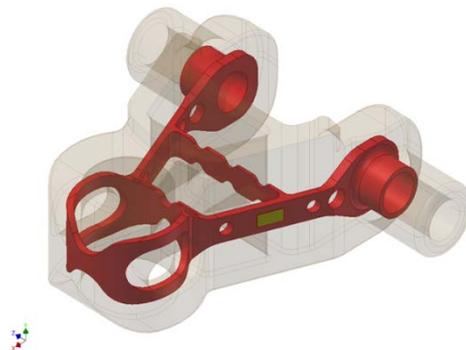


Abbildung 6. Entwurf einer Einlegergeometrie

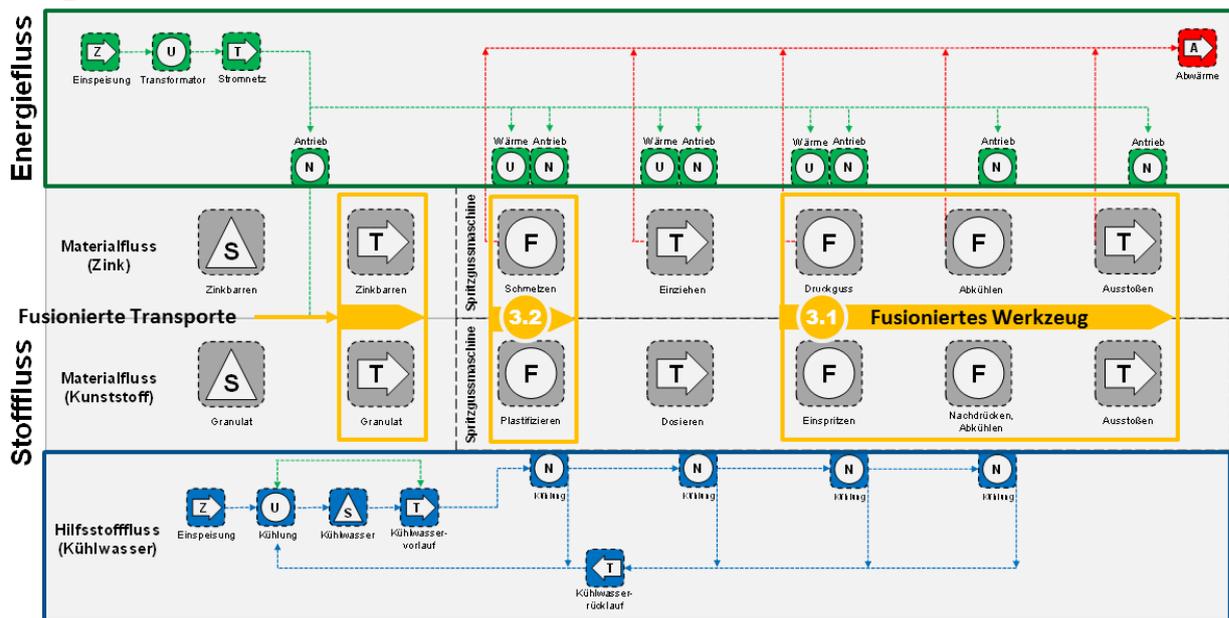
Der Einleger muss nun so ausgelegt werden, dass er ohne großen Aufwand im Druckgusswerkzeug gefertigt werden kann. Weiterhin besteht die Maßgabe, dass eine kraftflussgerechte Konstruktion erfolgt, um die auftretenden Belastungen optimal im Einleger zu verteilen. Die Einlegergeometrie wird dabei so angepasst, dass im Bereich der Bolzenaufnahme keine Kunststoffschicht zwischen Bolzen und Einleger vorkommt, um die Kraft direkt in den Einleger einzuleiten. Im Bereich der Pinaufnahme ist eine Kunststoffzwischenschicht zwingend notwendig. Hier kommt es zu Relativbewegungen zwischen Pin und Kettenglied, Pin und Bolzen als auch Bolzen und Kettenglied. Die tribologische Beanspruchung ist in diesem Bereich besonders ausgeprägt. Die Durchbrüche in den Zugträgern und die Einschnitte am Quersteg wurden vorgesehen, um den Formschlussanteil zu erhöhen. Zusätzlich wird, durch die Kontraktion des Kunststoffes

beim Abkühlen der Schmelze, eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Metalleinleger und Kunststoffummantelung erreicht. Momentan befindet sich die Auslegung des Kettengliedes im Stadium der Berechnung und Topologieoptimierung. Erste Ergebnisse zeigten, dass sich sowohl Kettenlänge als auch die Spannungen im Kunststoffkettenglied durch die Verstärkungsstruktur reduzieren lassen.

Ein weiterer wichtiger Fakt der beim Ketten- bzw. Einlegerdesign beachtet werden muss, ist, dass ausreichend Platz an geeigneter Stellen für die Applikation von Sensorik und mikroelektronischen Bauteilen vorgesehen wird. Eine günstige Position für diese Bauteile ist z.B. auf

den Zugträgern. Über diese wird die Kraft im Kettenglied übertragen. Um die Kettendehnung und Kettenzugkraft im Betrieb überwachen zu können, ist es sinnvoll an dieser Stelle Dehnungsmessstreifen anzubringen. Mit Hilfe dieser ist eine umfassende Systemanalyse möglich und insbesondere die Detektion von Lastkollektiven und Lastspitzen ist höchst interessant, da dadurch eine Abschätzung der Austauschintervalle von Ketten erfolgen kann. Würde man die DMS direkt am Kettenglied (Kunststoff) anbringen, dann würde es aufgrund des viskoelastischen Werkstoffverhaltens zu keiner qualitativen Aussage über die Belastung am Kettenglied während des Förderprozesses kommen.

**1 Fusionierte Energieversorgung und Antriebe**



**2 Fusionierte Kühlkreisläufe**

Abbildung 7. Das Flussmodell für den entwickelten fusionierten Fertigungsprozess aus Kunststoffspritzguss und Metall-druckguss

**4 EFFIZIENTER FERTIGUNGSPROZESS**

**4.1 WERKSTOFFE / HERSTELLUNGSVERFAHREN<sup>1</sup>**

Die Herstellung des Kunststoffkettengliedes mit metallischer Verstärkungsstruktur erfordert ein mehrstufiges und auf die verwendeten Werkstoffe abgestimmtes Ferti-

gungskonzept. Die Fertigung von Metallkomponente und Kunststofffertigteil ist dabei getrennt zu betrachten. Im Metalldruckgussprozess wird zunächst die metallische Verstärkungskomponente hergestellt. Dieser Urformprozess erfordert eine separate Druckgussform in der schmelzflüssiges Metall (Zink/Aluminium) mit einem hohen Grad an Gestaltungsfreiheit zu einem entsprechenden Einlegeteil verarbeitet wird. Im anschließenden Spritzgießprozess erfolgt unter Verwendung der im Druckguss hergestellten Verstärkungsstruktur die Komplettierung des Kettengliedes. Dabei wird die Verstärkungsstruktur zunächst mit einem geeigneten Haftvermittler vorbehandelt. Anschließend erfolgt in einem Spritzgießwerkzeug die Ummantelung mit einem ausgewählten thermoplastischen Kunststoff.

<sup>1</sup> Dieses Kapitel entstand u.a. im Rahmen der Diplomarbeit von F. Kimme mit dem Titel "Planung der Logistik für fusionierte Fertigungs- und Montageprozesse" und der Projektarbeit von Brigl, T., Dotzer, A., Lehmeier, M. mit dem Titel "Konzeption und workshoporientierte Anwendung eines Logistikplanungsvorgehens im Bereich fusionierter Produktionsprozesse von Hybridbauteilen", welche von der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb der TU-Chemnitz betreut wurden.

Wenn man die Fertigungstechnologien fusionieren möchte, ist es sinnvoll die Systemflüsse wie Energie- und Stoffflüsse unter dem Gesichtspunkt Transformation, Speicherung und Transport zu betrachten, um Potential zur Vereinigung von Technologieschritten zu untersuchen (siehe Abbildung 7). Bezüglich der Herstellung einer Kunststoffgleitkette gibt es Potentiale bzgl. des Energieflusses. Die Kombination der Energieversorgung (Punkt 1 in Abbildung 7) in einem gemeinsamen Energienetz für beide Technologien Spritzguss und Druckguss könnten Energieverluste vermieden und durch ein gemeinsames Netz Kosten reduziert werden. Dieselben Effekte hätte die gemeinsame Nutzung von Hauptantrieben. Auch der Hilfsstofffluss könnte fusioniert werden, in dem z.B. Kühlsysteme in einen Kühlkreislauf (Punkt 2 in Abbildung 7) zusammengefasst werden. Die Fusionierung des Materialflusses wäre ebenso denkbar. Beispielsweise könnten beide Fertigungsverfahren mit Hilfe eines modular aufgebauten Werkzeuges und mehreren Schließeinheiten sowie Handlingrobotern fusioniert werden (Punkt 3.1 in Abbildung 7). Durch das modular aufgebaute Werkzeug können darüber hinaus Kavitäten schneller getauscht und damit kleinere Produktionslose eingestellt werden. Durch die Fusion der Materialflüsse kann der Transportaufwand im Vergleich zu Maschinenlinien stark verkleinert werden. Veränderung des Materials für den Metallinleger von einer Aluminiumlegierung zu einer Zinklegierung mit niedrigerem Schmelzpunkt könnte die getrennten Schmelzöfen von Kunststoff und Metall temperaturseitig näher zusammenführen (Punkt 3.2 in Abbildung 7), damit könnte Energie eingespart werden. Auch die Bündelung der Eingangsmaterialien und damit der Materialbereitstellung (Punkt 3 in Abbildung 7) hätte positive Auswirkungen auf die Fertigung. Da so Logistikprozesse eingespart werden könnten.

#### 4.2 WERKZEUGKONZEPT

Für die Umsetzung des Kettengliedes im Spritzgießverfahren ist ein spezielles Werkzeugkonzept erforderlich. Dabei ist in erster Linie sicherzustellen, dass eine positionsgenaue Fixierung der metallischen Verstärkungsstruktur in der Werkzeugkavität gewährleistet ist. In diesem Zusammenhang sind die fertigungsbedingten Maßtoleranzen des Einlegeteiles zu beachten. Die Verstärkungsstruktur besitzt im Bereich der Bolzendurchführung Bauteilwandkontakt und kann in diesem Bereich durch einen beweglichen Kern aufgenommen werden. Um ein verdrehen der Verstärkungsstruktur unter dem Einfluss des Schmelzdrucks zu vermeiden, ist eine Fixierung der Struktur in einem weiteren Kavitätsbereich vorzusehen.

Aufgrund der vergleichsweise komplexen Geometrie des Kettengliedes ist ein aufwendiger Mechanismus für die Entformung des Formteiles notwendig. Neben der Hauptentformungsrichtung, die durch die Schließbewegung des Werkzeuges realisiert wird, sind zusätzlich Kernzüge erforderlich, um die Bereiche der Bolzendurch-

führungen quer zur Hauptentformungsrichtung freizugeben. Für die Auslegung des Werkzeugsystems spielen neben den Maschinenrandbedingungen die vorliegenden Prozessgegebenheiten eine entscheidende Rolle. Dies gilt insbesondere in Bezug auf das Formfüllverhalten sowie auf die Temperaturführung. In einer Spritzgießsimulation sind deshalb die Fließeigenschaften der verwendeten Kunststoffmaterialien zu untersuchen. Darüber hinaus gilt es, Aussagen über das fertigungsbedingte Schwindungs- und Verzugsverhalten des Bauteiles zu treffen, die eine wichtige Basis für den Konstruktionsprozess des Werkzeuges darstellen. Um die Komplexität des Gesamtkonzepts aufzuzeigen, ist in Abbildung 8 beispielhaft ein Werkzeug zu sehen, welches in einem früheren Projekt für die Herstellung textilverstärkter Kunststoffkettenglieder entwickelt wurde.

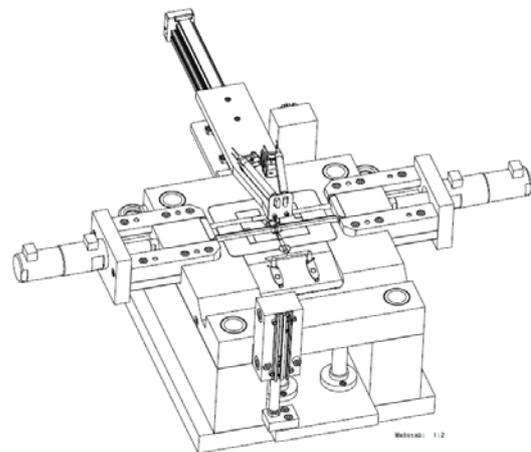


Abbildung 8. Werkzeugsystem (AS) zur Fertigung textilverstärkter Kunststoffkettenglieder [Sch13]

#### 4.3 LOGISTIK UND METHODENENTWICKLUNG ZUR MATERIALBEREITSTELLUNG<sup>1</sup>

Die Herausforderungen für die Logistikplanung resultieren aus der räumlichen Konzentration von fusionierten Fertigungs- und Montageprozessen, die zu einer räumlichen Konzentration des Material- und Einzelteilhandlings und dementsprechend der Logistikprozesse führen (siehe Abbildung 9).

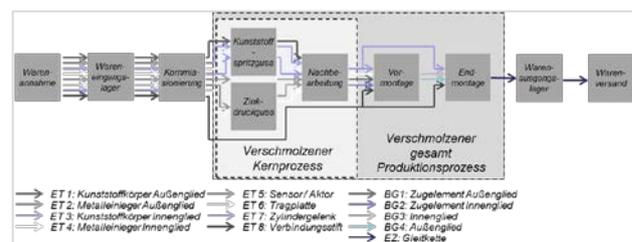


Abbildung 9. Darstellung der gebündelten Materialflüsse im Rahmen der fusionierten Fertigung von Kunststoffgleitketten

Daraus folgt ein sehr begrenzter Platz für die Materialbereitstellung und den -abtransport. Der Materialfluss ist durch verschiedenste Inputs (Rohmaterialien, Halbzeuge, Sensoren, Aktoren und Verpackungsmaterial sowie Ladungsträger für Endprodukte, Restmaterialien und Abfall) und Outputs (Endprodukte, Restmaterialien und Abfall) gekennzeichnet. Die Materialien weisen zudem verschiedene Eigenschaften (Schüttgüter, Stückgüter, Mengen, Volumen, Massen, Ladungsträger, Handlinganforderungen etc.) auf.

**Logistikkonzept:** Unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen und basierend auf konventionellen Gestaltungsgrundsätzen für die Massenproduktion wurden Gestaltungsgrundsätze speziell für die Massenproduktion von Leichtbaukomponenten mittels fusionierter Prozesse erarbeitet. Auf Basis dieser Untersuchungen wurden prinzipiell geeignete Logistikkonzepte wie die JIT/JIS-Logistik [Dic09, BKP10], verschiedene Materialbereitstellungskonzepte [LW12, Röh02, Nyh09] und Warenkorbbkonzepte [Vah08, GMD13] bestimmt, die für den Anwendungsbereich von MERGE angepasst und erweitert wurden [WRMK14]. Daraus wurden einzelne Attribute für die Materialbereitstellung und die Logistiksteuerung

[Dic09, BKP10] abgeleitet, welche sich z. B. auf spezielle Ladungsträger, Vorkommissionierung und Auslösung der Materialbereitstellung (durch eKANBAN und RFID) beziehen. Außerdem wurde der Materialfluss bzw. Logistikprozess spezifiziert. Die Eigenschaften des neuen Logistikkonzeptes sind:

- Bündelung der unterschiedlichen Materialflüsse zu einem einzelnen
- Transport und Bereitstellung aller Ausgangsmaterialien für eine zuvor bestimmte Produktmenge gemeinsam auf einem speziellen Ladungsträger
- Abtransport von Produkten, Restmaterialien und Abfall aus der Produktion ebenfalls in diesen Vorgang integriert

Durch die Anwendung des neuen Logistikkonzeptes kann ein schlanker, gerichteter, geordneter und teilweise getakteter Materialfluss realisiert werden. Der sich dadurch auszeichnet, dass die An- und Abtransporte sowie die Bereitstellung aller Ausgangsmaterialien für eine bestimmte Produktmenge in einem einzelnen Transportspiel stattfinden, welches die Komplexität der Transport- und Bereitstellungsvorgänge verringert.

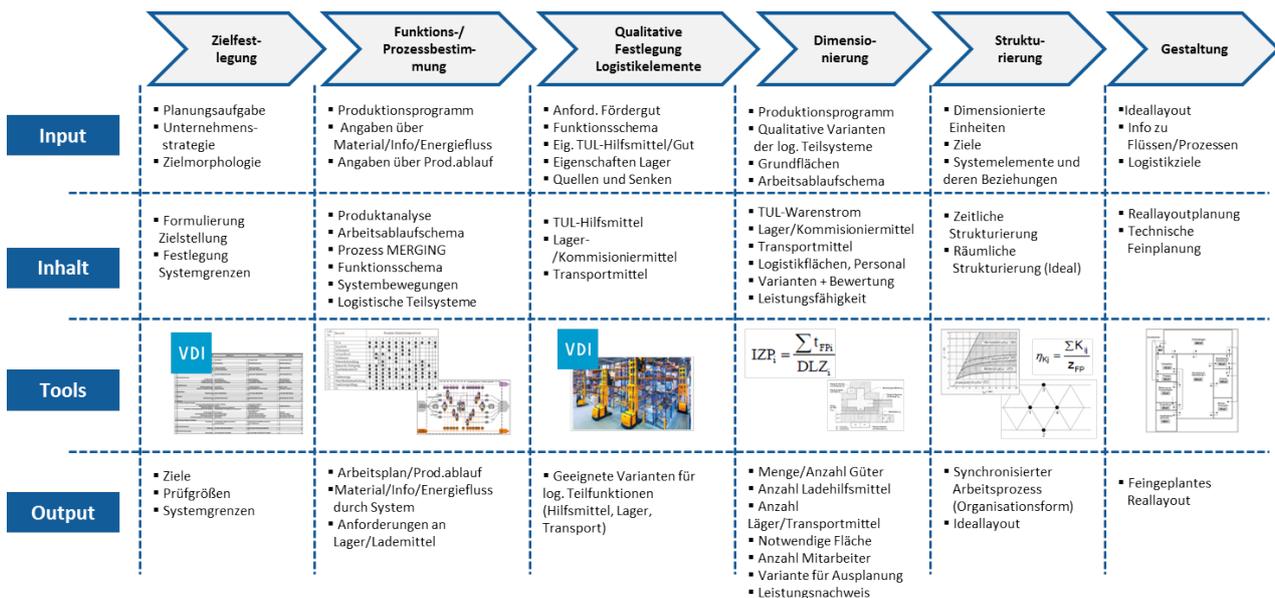


Abbildung 10. Das entwickelte Logistikplanungsvorgehen für Produktionssysteme für multifunktionale Leichtbaukomponenten

**Logistikplanungsvorgehen:** Ein weiteres Ergebnis ist ein Vorgehen zur Planung der Logistik (siehe Abbildung 10) speziell für Produktionssysteme multifunktionaler Leichtbaukomponenten, die durch fusionierte Fertigungs- und Montageprozesse hergestellt werden. Hier wurde ebenfalls untersucht, welche bestehenden Planungsvorgehen als Grundlage [Paw07, tHSN07, BL94, KSG10, VDILog] dienen können. Das Planungsvorgehen wurde in Phasen und Schritte untergliedert, wobei ihre Inhalte (Input, Planungsaufgaben, Methoden, Tools, Output)

tabellarisch aufbereitet und im Einzelnen beschrieben wurden.

- Schrittweise Abfolge von Planungsaktivitäten zur Gestaltung des Logistiksystems
- Neuer Ansatz zur Dimensionierung und Auslegung eines Spezialwarenkorb für massengefertigte Hybridbauteile
- Verwendung von Morphologien zur schnelleren Planung

- Verwendung von Modellen wie bspw. Flusssystemmodelle, um das Verständnis für fusionierte Fertigungsprozesse und deren Herausforderungen zu entwickeln
- Exemplarische Anwendung des Planungsvorgehens anhand einer theoretischen Fallstudie für die Fertigung und Montage von metallisch verstärkten Kunststoffgleitketten

Der Fokus des Logistikplanungsvorgehens liegt auf der Auslegung (qualitativ und quantitativ) des Kernelementes des Logistikkonzeptes – dem Spezialwarenkorb für hybride Massenbauteile. Im ersten Teil des Auslegungsprozesses werden qualitativ alle Einzelelemente des Warenkorbes ausgewählt und damit grobe Anforderungen an die Transportmittel gestellt. Hierzu werden die Anforderungen und Eigenschaften des Fördergutes, die zugehörigen Handhabungsgeometrien, das Funktionsschema (Arbeitsablauf), die Logistikoperationen und –prämissen benötigt. Zu Beginn werden die eingehenden Daten bspw. hinsichtlich Art und Menge des Fördergutes und Positionierung im Warenkorb analysiert. Anschließend werden qualitativ verschiedene Warenkorbkonzepte erarbeitet. Hierbei kann die entwickelte Warenkorbmorphologie herangezogen werden. Im letzten Schritt werden die Warenkorvarianten mit Hilfe einer Einflussmatrix und einer Nutzwertanalyse bewertet sowie der Warenkorb letztlich ausgewählt.

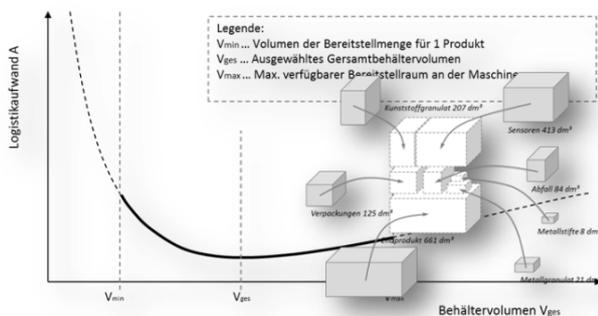


Abbildung 11. Auslegung eines Spezialwarenkorb unter Beachtung des Logistikaufwandes und Behältervolumens

Im zweiten Teil des Auslegungsprozesses wird der Warenkorb dimensioniert (siehe Abbildung 11), d.h. die Anzahl der im Warenkorb befindlichen Ladehilfsmittel errechnet und die technischen/konstruktiven Parameter bestimmt. Hierzu sind das gewählte Warenkorbkonzept und die Eigenschaften/ Mengen der Fördergüter notwendig. Zu Beginn des zweiten Teils des Auslegungsprozesses sind entsprechend die räumlichen Umgebungsrestriktionen (Raumhöhe, Gangbreite, Kurvenbreite, etc.) zu definieren, welche die Warenkorbgröße beeinflussen. Anschließend sind alle erforderlichen Dimensionierungsgrößen wie Art und Anzahl der Warenkorbinlays, Warenkorbaufteilung, Gewichtsverteilung festzulegen. Im letzten Schritt ist die erforderliche Anzahl an Warenkörben zu bestimmen, um den Logistikprozess abzusichern.

**Logistikworkshop:** Zielstellung des Logistikworkshops ist es, das entwickelte Logistikplanungsvorgehen zu evaluieren und Kenntnisse zur Logistikplanung bei fusionierten Fertigungsprozessen zu vermitteln. Um einen schnellen Planungsablauf zu gewährleisten, welcher von der Praxis gefordert wird, sind entsprechende Vorlagen wie Übersichtsblätter, Excel-Schemata für die Morphologien und Berechnungen, Screencast zur Erklärung der Excel-Schemata, Datenblattsammlung und kurze, prägnante Ablaufdarstellung mit Ausgangssituation notwendig. Schwerpunkte im Workshop lagen auf den Themenfeldern „Problematik fusionierte Fertigungsprozesse“ und „Wissensvermittlung/ Evaluierung der Warenkorbauslegung“. Für die Erläuterung der Fusionierung von Technologien wird die Flusssystemtheorie von Wirth [Wir89] angewendet (siehe Abbildung 12). Um Warenkörben schnellstmöglich auslegen zu können, kommt eine Morphologie zum Einsatz, welche aus den Kriterien Warenkorbauslegungsansatz, -gerüst, -bestückung, -übergabetechnik, -inhalt, -inlay und -aufnahme besteht und jeweils teilweise bis zu 13 Kriterien enthält. Die Workshopteilnehmer können so ihren ganz individuellen Warenkorb qualitativ zusammenstellen und anschließend mit Hilfe einer Nutzwertanalyse bewerten.



Abbildung 12. Workshopteilnehmer erörtern mit Hilfe der Flusssystemtheorie die Problematik der Technologiefusionierung

Der Workshop wurde bisher einmal mit 6 Studenten, die bereits Vorkenntnisse im Bereich Fabrikplanung und Logistik aus Vorlesungen und Projekten haben, in einer Zeit von 230 min durchgeführt. Dies ist darin begründet, dass aufgrund des großen inhaltlichen Umfangs und der knappen Zeitdauer keine allgemeinen Grundlagen näher beleuchtet werden konnten. Der Workshop wurde von 3 Moderatoren geführt und mittels Fragenbogen mit 3er und 4er Skalen evaluiert. Es konnte damit evaluiert werden, welche Eignung man für die Nutzung des Planungsvorgehens haben muss. Die ausgewählten Teilnehmer konnten die an sie gestellten Aufgaben bewältigen und sich auch ein Urteil über die Vollständigkeit und Reihenfolge der Logistikplanungsschritte erlauben. Sie bewerteten ent-

sprechend mit 1,0-1,5 von 4 möglichen Punkten, welches „trifft völlig zu“ entspricht. Im Workshop sollte des Weiteren das entwickelte Logistikplanungsvorgehen evaluiert werden. Hierbei mussten die Teilnehmer neben der Beurteilung der Logistikplanungsschritte, die Praktikabilität der eingesetzten Medien und Methoden sowie die Schwerpunktesetzung im Workshop beurteilen. Sie entschieden sich zwischen 1,2 und 1,5 von 4 möglichen Punkten zu geben, welches „trifft völlig zu“ entspricht. Ein weiteres Ziel des Workshop war es Wissen zu fusionierten Fertigungsprozesse, dem neu entwickelten Logistikkonzept und allgemeinen Methoden zur Fabrik- und Logistikplanung zu vermitteln, da der Workshop auch zur Weiterbildung eingesetzt werden soll. Die Workshopteilnehmer beurteilten dies mit „trifft völlig zu“ bis „trifft teilweise (1,3-1,7) zu. Insgesamt kann der Workshop entsprechend den Ergebnissen aus dem Fragebogen als sehr erfolgreich bezeichnet werden. Vor allen Dingen das Prozess-Merging und die Herangehensweise zur Logistikplanung sowie die morphologischen Tabellen zur Bewertung und Auswahl sind bei den Workshopteilnehmern auf großes Interesse gestoßen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklung des Demonstrators Conveyor Complex (CCX) ist eine komplexe Thematik, an der Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen mitwirken müssen, um die Komplexität des Forschungsvorhabens im Ganzen erfassen zu können. Aus diesem Grund arbeiten die Professur für Fördertechnik, die Professur für Strukturleichtbau und die Professur für Fabrikplanung und Fabrikbetrieb der TU Chemnitz im Rahmen des Bundesexzellenzclusters „MERGE“ zusammen und betreiben Forschung auf dem Gebiet fusionierter Fertigungsprozesse zur Herstellung fördertechnischer Komponenten. Der Fokus der Forschungsarbeiten besteht darin, eine konventionelle Kunststoffgleitkette in ihrer Funktion zu erweitern und sie somit für neue Anwendungsfelder nutzbar zu machen.

Die erste Funktionserweiterung befasst sich mit der Verstärkung des Kettengrundglieds (Zugelements) mittels metallischer Verstärkungsstrukturen. Aufgrund der hohen Gestaltungsfreiheit für Bauteile, welche durch einen Metalldruckgussprozess erzielt werden kann, fällt die Werkstoffauswahl für das Inlay auf Zinkdruckguss- und Aluminiumdruckgusslegierungen. Als Kettengrundwerkstoff kommt POM und PBT zum Einsatz. Erste Ergebnisse zum Haftungsverhalten von Kunststoff und Metall zeigen, dass nur minimaler Stoffschluss zwischen den ausgewählten Werkstoffen auftritt. Der Einsatz von chemischen Haftvermittlern und die Einbringung von Rauigkeiten in die Metalloberfläche haben zur deutlichen Verbesserung des Anbindungsverhaltens geführt. Momentan wird ein eigens auf die Materialpaarung angepasster Haftvermittler entwickelt, welcher eine weitere Optimierung des Stoff-

schlusses verspricht. Neben der stoffschlüssigen Verbindung sind Maßnahmen zur kraft- und formschlüssigen Verbindung von Metall und Kunststoff getroffen worden. So wurden bei der Einlegerstruktur z.B. Bereiche gezielt geometrisch verändert (Hinterschnitte, Bohrung). Aktuell laufen numerische Analysen, um das Inlay belastungs- als auch fertigungsgerecht auszulegen.

Die zweite Funktionserweiterung betrifft die Integration von Sensorik in das Kettengrundglied und die Tragplatte. Damit soll auf der einen Seite das Fördersystem überwacht werden (Zugkraftmessung, Kettenlängung), auf der anderen Seite ist man dadurch in der Lage den Logistikprozess zu steuern und zu überwachen (Füllstandsüberwachung, Kühlstrecken, automatischer Not-Aus bei Überlastung, usw.). Nach Voruntersuchungen wurde die Applikation von Dehnungsmessstreifen auf die Verstärkungsstruktur und die Entwicklung einer drucksensitiven Tragplatte fokussiert. Momentan laufen Untersuchungen zur Positionierung der DMS und zu deren Installation während des fusionierten Fertigungsprozesses.

Um die Kunststoffgleitkette in fusionierten und großserientauglichen Prozessen fertigen zu können, besteht die Maßgabe neue Werkzeug- und Fertigungskonzepte zu entwickeln. Hierbei ist auf ein energieeffizientes und ressourcenschonendes Gesamtkonzept zu achten. Als Grundlage dafür werden aktuell die Urformverfahren Metalldruckguss und Kunststoffspritzguss hinsichtlich ihres Prozessablaufes untersucht, um Potentiale für eine fusionierte Fertigung zu verdeutlichen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung eines modular aufgebauten Werkzeugsatzes mit wechselbaren Kavitätseinsätzen und mehreren Schließeinheiten sowie Roboter zum Handling und zur Sensorapplikation vorteilhaft ist, um den Material- und den Energiefluss zu verschlanken und somit zusätzliche Logistikprozesse eingespart werden können. Weiterhin ist es aus logistischer Sicht notwendig, die Materialflüsse für den Fertigungsprozess zu bündeln. Dies kann nach aktuellen Forschungsergebnissen nur mit Hilfe eines speziell dafür entwickelten Warenkorbes erreicht werden. Die Zweckmäßigkeit des Warenkorbes und der dazugehörigen Logistikplanung wurde anhand einer Fallstudie und eines Workshops erfolgreich evaluiert. In weiteren Arbeitsschritten werden die entwickelten Morphologien für den Logistikbetrieb erweitert, um für unterschiedliche Lastfälle passende Warenkorbb Konfigurationen sowie Transportmittel wählen zu können. Hierzu werden Experimente in der Experimentier- und Digitalfabrik der Professur Fabrikplanung und -betrieb durchgeführt. Zur besseren Urteilsfindung in der Logistikplanung und im Logistikbetrieb wird ein virtuelles und dynamisches Modell entwickelt, um die Materialflüsse und strukturellen Systemzusammenhänge im fusionierten Produktionssystem zur Herstellung von Hybridbauteilen abzubilden und stochastische Einflüsse zu untersuchen.

**Fördervermerk:**

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Bundesexzellenzcluster EXC 1075 „Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen“ und wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.

**LITERATUR**

- [BKP10] Bichler, K; Krohn, R.; Philippi, P : Gabler Kompaktlexikon Logistik; 1.900 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden. Gabler Verlag, Wiesbaden 2010
- [BL94] Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.: Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Teubner Verlag, Stuttgart 1994
- [BÜH13] Bühlig-Polaczek, Andreas; Michaeli, Walter; Spur, Günter: Handbuch Urformen. Carl-Hanser Verlag, München 2014. – ISBN 978-3-446-42035-9
- [Dic09] Dickmann, P. : Schlanker Materialfluss; mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2009
- [GMD13] Gläserne Manufaktur Dresden: Schuppenband - Die Gläserne Manufaktur. Abgerufen am 22.10.2013 von <http://www.glaesernemanufaktur.de/de/fertigung/schuppenband>, 2013
- [Joh82] Johnen, H.J: Gießen mit Zink. Verfahren, Eigenschaften, Anwendungen, Bearbeitung, Oberflächenbehandlung. Zinkberatung e.V. Düsseldorf, Düsseldorf 1982. – ISBN 3-88754-002-6
- [KSG10] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung; mit zahlreichen Checklisten. Hanser Verlag, München 2010
- [LW12] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. : Montage in der industriellen Produktion; ein Handbuch für die Praxis. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2012
- [MEY13] Meyer, M.; Schreiter, M.; Nendel, W.; Kroll, L.: Effiziente Herstellung textiler Hochleistungsbauteile durch integrative Spritzgießtechnologien. In: GEHDE, M. (Hrsg.): 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. Chemnitz: 14.-15.11.2013, ISBN 978-3-939382-11-9.
- [NWM12] Näser, P.; Wagner, U.; Müller, E.:RFID Supported Packaging – E-Kanban Application in Package Logistics and Learning Laboratory. In: Proceedings of The 2nd Second International Conference Product and Packaging – Paths in Progress – P&P 2012, Lodz (Polen)
- [NYH09] Nyhuis, P.: Konzepte und Möglichkeiten einer bestandsarmen, zeitnahen Materialbereitstellung. Wiesloch: 5. Sitzung AWF AG Moderne Produktionslogistik, 2009
- [Paw07] Pawellek, G.: Produktionslogistik; Planung – Steuerung – Controlling. Hanser Verlag, München 2007
- [Röh02] Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionseinstufen. Hochschulschrift. VDI Verlag, Düsseldorf 2002
- [SCH13] Schreiter, M.; Klärner, M.; Weise, M.; Schmidt, H.; Kroll, L.; Meyer, A.: Textilverstärkte Hochleistungsbauteile – Simulationsgestützte Bauteilauslegung und integrative Spritzgießtechnologien. 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde 2013. Karlsruhe: 03.-05.07.2013.
- [tHSN07] ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme; Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2007
- [Vah08] Vahrenkamp, R.: Produktionsmanagement. Oldenbourg Verlag, München 2008
- [VDI34] VDI-Richtlinie 3400
- [VDILog] Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinien zur Logistik - Logistikplanung: allgemeine Planungsphasen und Grobinhalte, Detailinhalt zur Materialflussplanung, Methoden zur Integration von Lean-Ansätzen, Optimierung des Materialflusses, Bewertung mittels standardisierter Logistikkennzahlen; Materialflussteuerung: Planungsphasen, Verknüpfung von Fertigungsstufen mittels JIT/JIS-Prinzipien; Logistiktechniksysteme: Fördermittel, Fahrerlose

Transportsysteme, Kommissioniersysteme, Materialpuffer, Kleinbehälterfördersysteme; VDI 5200; 2498; 2870; 3595; 2525, 4400; VDI 3961, 2512; VDI 2366; 2510, 2710, 2513; 3590; 3631; 3635

[Wir89] Wirth, S. (Hrsg.): Flexible Fertigungssysteme. Verlag Technik, Berlin 1989

[WRMK14] Wagner, U.; Riedel, R.; Müller, E. und Kimme, F.: Planning of Logistics for Large-scale Production of Metal-plastic-hybrid Components. Procedia CIRP, 17, 2014, 600-605.

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andreas Merkel**, Research Assistant at the Professorship of Factory Planning and Factory Management, Technische Universität Chemnitz. Andreas Merkel was born 1982 in Karl-Marx-Stadt (now Chemnitz), Germany. He studied Business Administration and Engineering at the Technische Universität Chemnitz and is responsible for different research and industry projects in the field of logistic and factory planning with the focus on participatory development since 2009.

**Dipl.-Ing. Michael Schreiter**, Research Assistant at the Professorship of Lightweight Structures and Polymer Technology, Technische Universität Chemnitz. Michael Schreiter was born 1981 in Bad Muskau. He studied Mechanical Engineering and Polymer Technology at Technische Universität Chemnitz.

---

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel**, was born in 1951 and studied Mechanical Engineering in Karl-Marx-Stadt (now Chemnitz), Germany. He is director of the Institute of Materials Handling, Conveying and Plastics Engineering as well as director of the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering.

**Prof. Dr.-Ing. Egon Müller**, was born 1952 and studied Mechanical Engineering and Factory Design at the Ingenieurhochschule Zwickau, where he was awarded his doctorate in 1984. He is Managing Director at the Institut of Management and Factory Systems as well as Director of the Professorship of Factory Planning and Factory Management at the Technische Universität Chemnitz.

**Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll**, was born in 1959 and studied Vehicle Technology and Mechanical Engineering in Opole (Poland) and Clausthal. He is director of the Institute of Lightweight Structures, dean of the Faculty Mechanical Engineering and CEO of the federal cluster of Excellence MERGE.

**Dr.-Ing. Jens Sumpf**, Group Leader „Traction Mechanisms and Tribology“ at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, Technische Universität Chemnitz. He was born in 1966 and studied Mechanical Engineering in Chemnitz, Germany.

**Dipl.-Ing. Clemens Rohne**, Research Assistant at the Professorship of Materials Handling and Conveying Engineering, Technische Universität Chemnitz. Clemens Rohne was born 1985 in Görlitz. He studied Automotive Construction: Materials and Components at Technische Universität Bergakademie Freiberg.

### Technische Universität Chemnitz

Institut für Fördertechnik und Kunststoffe  
Professur Fördertechnik  
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz  
Telefon: +49(0)371 531 23110

Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme  
Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb  
Erfenschlager Straße 73, 09125 Chemnitz  
Telefon: +49(0)371 531 35309

Institut für Strukturleichtbau  
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung  
Reichenhainer Straße 31/33, 09126 Chemnitz  
Telefon: +49(0)371 531 23120