

Ebener Seilroboter mit HM-HT-Faserseilen als Regalbediengerät in Kommissionierlagern

2-dimensional HMHT-fiber-rope driven cable-robot in push-through rack storage warehouses

Christoph Müller¹, Markus Helbig¹, Markus Golder¹, Wolf Sattler²

¹Professur Förder- und Materialflusstechnik, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Technische Universität Chemnitz, ²Altratec Automation GmbH

Die Kommissionierleistung konventioneller reihenkinematischer Handlingsysteme ist begrenzt. Mit zunehmendem Nutzmasseverhältnis (abnehmender Gutmasse) werden diese Anlagen ineffizient. Besonders die Hochfrequenzlagertechnik mit Zugriffen binnen weniger Sekunden ist auf neue Lösungen angewiesen. An der Professur Förder- und Materialflusstechnik wird seit 2016 ein Handling-Konzept mit Faserseilen als Seilroboter für diese Anwendung entwickelt. Es handelt sich dabei um ein im Sinne des Nutzmasseverhältnisses hochgradig effizientes System. Ebenso bemerkenswert ist die erreichbare Dynamik. Weitere Vorteile sind eine äußerst geringe Schallemission sowie ein Prinzip bedingt flurfrees Fördersystem.

[Schlüsselwörter: Faserseil, Fördertechnik, Anwendung, Seilroboter, Durchlaufregal]

Order picking systems with serial kinematic axis setup are limited in performance. There is a loss in efficiency with increasing payload ratio. Especially high-frequency storage systems with extremely fast picking operations require new solutions. Hence, a new concept of a cable-robot with fiber-ropes has been developing since 2016. High efficiency in terms of payload-ratio is achieved as well as high dynamics in positioning. Furthermore low acoustical emission is a characteristic of such systems. As a matter of principle the system is an overhead conveyor.

[Keywords: fiber-rope, material-handling, application, cable-robot, push-through rack storage]

1 EINLEITUNG

Kunstfaserseile aus HM-HT-Fasern sind prädestiniert für Anwendungen bei denen geringes Eigengewicht und hohe Dynamik der Bewegung erforderlich sind. Laufende Faserseile in der Fördertechnik bieten Möglichkeiten für verbesserte Wirkmechanismen, Gewichtseinsparung und

gänzlich neue Anwendungsszenarien. Neben den klassischen Einsatzgebieten von Stahldrahtseilen (Krane, Aufzüge, Schachtfördertechnik), lassen sich auch eine ganze Reihe weiterer Einsatzszenarien finden, bei denen Faserseile vorteilhaft sein können. Häufig wird die konkrete Anwendung überhaupt erst durch das Faserseil denkbar. In einigen Fällen entsteht so nicht nur eine Substitutionslösung (z.B. Aufzug mit Faserseilen) sondern eine komplett neue Anwendung. Ein Beispiel hierfür sind seilgeführte parallelkinematische Strukturen (Abbildung 1). Deren Eigenschaftsprofil kann wie folgt zusammengefasst werden i) Material- und Energieeffizienz, ii) skalierbare Arbeitsräume ohne wesentliche Massezunahme der Aktoren, iii) günstiges Nutzmasseverhältnis und daraus folgend eine hohe Dynamik und iv) hervorragende maschinenakustische Eigenschaften.

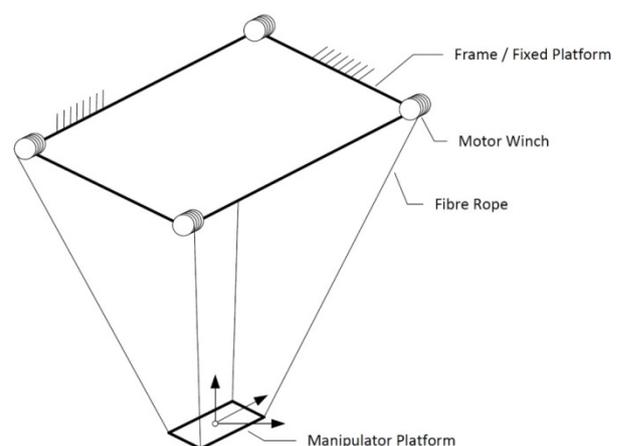


Abbildung 1. Seilgeführtes parallelkinematisches System (schematisch). Die Plattform erreicht ihre Stabilität nur infolge der Schwerkraftwirkung, nach [BRU13]

2 FASERSEILGEFÜHRTE PARALLELKINEMATISCHE SYSTEME

Seilroboter sind bekannt aus verschiedenen Anwendungen. Industriell kommen sie unter anderem zum Einsatz

als Regalbediengerät, Plattform für Bewegungssimulation oder Stadion Kamerasysteme. Antrieb und Führung des Aktors erfolgen mittels räumlich angeordneter, lasttragender Seilstränge. Diese Seilstränge werden durch Gestell-feste Motorwinden simultan angetrieben und somit der Ak-tor positioniert. Es lassen sich grundlegend drei Arten von parallelkinematischen Strukturen nach der Art der Bindung der Freiheitsgrade definieren (Tabelle 1).

Tabelle 1. Redundanzgrad in Anlehnung an [VER04]

Kurzz.	Bedingung*	Bedeutung
IRPM	$m \leq n$	Incompletely Restrained Positioning Mechanism
CRPM	$m = n + 1$	Completely Restrained Positioning Mechanism
RRPM	$m > n + 1$	Redundantly Restrained Positioning Mechanism

* m = Anzahl unabhängige Antriebe, n = Freiheitsgrade

Die Steifigkeit dieser Systeme nimmt mit jeder redundanten Achse zu, jedoch damit auch die Kosten für das Gesamtsystem (Abbildung 2). Dieser Effekt verhindert maßgeblich den Einsatz paralleler Strukturen in industriellen Anwendungen. Im vorliegenden Fall wurde sich aus diesem Grund für ein CRPM - System entschieden. Bei diesem sind gleich vielen unabhängige Antriebe wie bei einem reihenkinematischen System erforderlich.

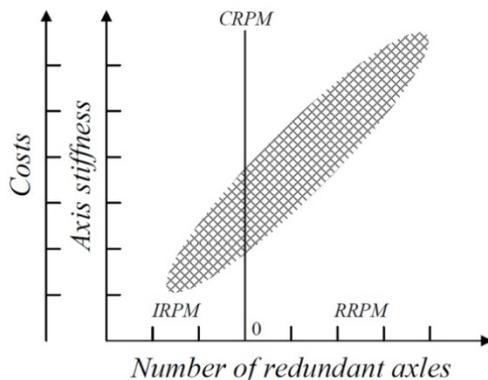


Abbildung 2. Achssteifigkeiten und Kosten parallelkinematischer Strukturen qualitativ

Konventionelle Antriebe, die häufig in reihenkinematischen Systemen verbaut werden, wie Zahnriemen- und Zahnstangentriebe, Kettentriebe oder Gewindespindeln, sind ursächlich für die Geräuschentwicklung der Gesamtanlagen. Zugrundeliegende Wirkmechanismen sind vor allem Zahneingriffsstöße und Reibung. Mit zunehmender Fördergeschwindigkeit, d.h. zunehmenden Leistungseintrag in das System, nimmt die Schallemission zu (Abbildung 3).

3 FÖRDERTECHNISCHE AUFGABENSTELLUNG

Die fördertechnische Aufgabe des in der Entwicklung befindlichen Konzeptes besteht darin, eine Kombination aus einem Durchlaufregal und einem seilgeführten Portal-system für Einlagerung bzw. Auslagerung zu schaffen. Dem Anwender und der dahinterliegenden Lieferkette soll so die Möglichkeit gegeben werden, auf der Einlagerungs-seite 7.000 gleiche Produkte einzulagern und zeitgleich 7.000 individuelle Produkte im Massebereich bis 2 kg aus-lagern zu können. Die konzipierte Lösung kann als Retro-Fit an bestehende Anlagen angebracht werden und ist adap-tiv in der Größe des zu bedienenden Regals / Lagers. Mit der Entwicklung sollen die Nachteile konventioneller RBG umgangen, respektive automatisierte Kommissionier-vorgänge überhaupt ermöglicht werden.

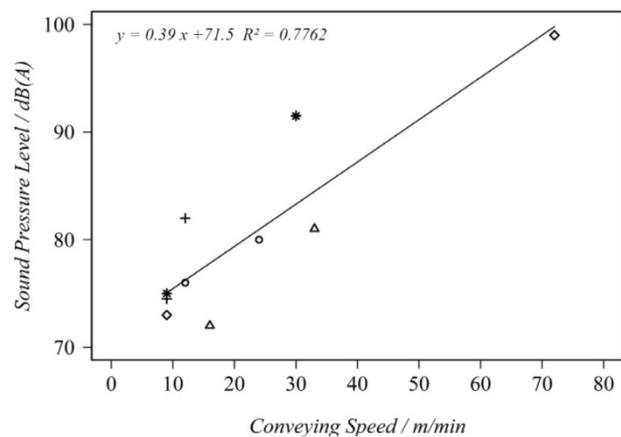


Abbildung 3. Schalldruckpegel über Fördergeschwindigkeit für fünf verschiedene Fördersysteme, zwei Messungen je System

Nachteile konventioneller RBG lassen sich wie folgt zusammenfassen. Soll ein Aktor (z.B. eines automatischen Regalbediengerätes) über große Entfernungen (ca. 25 - 50 m) mit hohen Geschwindigkeiten (bis zu 10 m/s) im Raum positioniert werden, so ist dies mit klassischen Linearachsen kaum oder nicht wirtschaftlich realisierbar. Masse, Material- und Energieeinsatz für sehr lange Line-arachsen in klassischer Bauweise stehen in einem äußerst ungünstigen und nicht zeitgemäßen Verhältnis zu der zu fördernden Nutzmasse (Nutzmasseverhältnisse im Bereich $10e2$ und größer). Hingegen sind die Vorteile die ein seil-geführter Roboter mit sich bringt diese: Seilroboter ermög-lichen eine wesentliche Steigerung der Effizienz durch Ma-terial- und Energieeinsparung. Es sind in weiten Grenzen frei skalierbare große Arbeitsräume möglich, wobei sich die Massenzunahme der Aktoren bei Vergrößerung des Ar-beitsraumes marginal gestaltet (längeres Seil). Es kann ein wesentlich günstigeres Verhältnis von Aktormasse zu Nutzmasse erreicht werden. Daraus wiederum leitet sich direkt eine wesentlich größere mögliche Dynamik der Ak-toren ab. Hinzu kommt bei Verwendung von Kunstfaser-

seilen eine äußerste Laufruhe, die mit klassischen mechanischen Achsen bei hohen Geschwindigkeiten unerreichbar ist.

4 KONZEPT

Die Antriebseinheit umfasst den Antrieb der beiden als Trag- und Positionierungselemente dienenden Seilepaare. Diese laufen vom Trommelantrieb über eine Changiereinheit weiter zu Umlenkrollen, die die Seile in die Arbeitsebene einführen. Von der Umlenkrolle zum Lastaufnahmemittel (Flyer) spannen die beiden Seilpaare den Arbeitsbereich auf und können mittels simultaner Längenänderung jede Position des Arbeitsbereiches erreichen. Es wird eine Funktionstrennung zwischen Bewegung des Gutes vor dem Regal (x-y-Achse vgl. Abbildung 4) und Entnahme des Gutes aus dem Regal (z-Achse vgl. Abbildung 5) angestrebt. Die Baugruppe Seil übernimmt als Trag- und Positionierungselement die zentrale kraftübertragende Funktion. Ausgeführt als biegeschlaffes Kunstfaserseil wird es nur infolge des Eigengewichtes des Flyers und der Gutmasse belastet. Erste Abschätzungen gehen von einem Eigengewicht des Flyers von ca. 10 kg bei einer Gutmasse von maximal 2 kg aus. Verfügbare Kunstfaserseilkonstruktionen erscheinen nach derzeitigem Wissensstand als in ihrer Leistungsfähigkeit ausreichend um die angenommenen Belastungen zu ertragen. Ungelöst ist bisher jedoch die Zuführung von Medien zum Aktor, da dies über konventionelle Energieketten nicht oder nur ungünstig machbar erscheint. Eine Medienintegration in die lasttragenden Seile wird angestrebt.

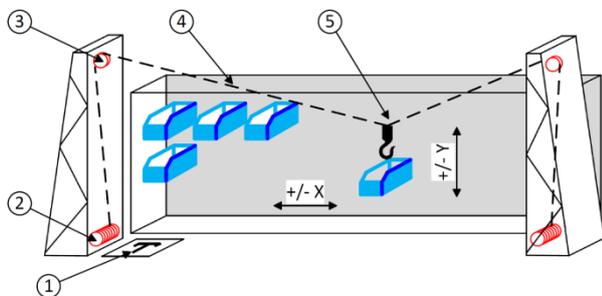


Abbildung 4. Auslagerungsseite des Durchlaufregallagers mit automatisiertem Handling. 1) Target (Kommissionierungspunkt), 2) Antriebseinheit, 3) Seilumlenkung in die Bewegungsebene des Seilroboters, 4) Seil zur Positionierung und Kraftübertragung, 5) Flyer

Der Flyer ist an den freien Enden der Seile befestigt und dient als mechanische Baugruppe zur Ankopplung der Last. Der Kraftfluss von der Gutaufnahmestelle über den Flyer in die Seile kann ausschließlich in vertikaler Richtung erfolgen. Querkräfte oder Momente können aufgrund der biegeschlaffen Tragelemente nicht aufgenommen werden. Zur Verdeutlichung des Wirkprinzips kann dem Flyer die analoge Funktion eines Kranhakens zugeordnet werden. An diesen wird das Gut automatisiert angehängt.

Diese Funktion wiederum wird von einem oder mehreren Autonomen Mechanischen Interfaces (AMIs) geleistet.

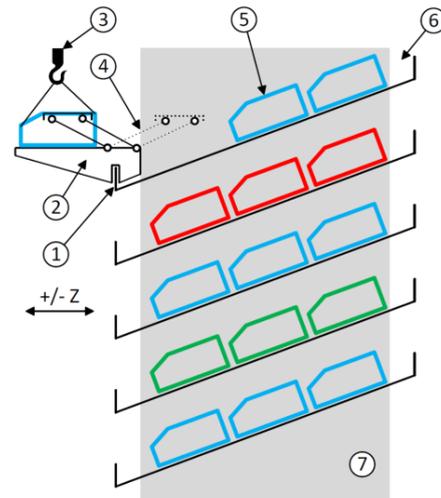


Abbildung 5. Querschnitt durch das Durchlaufregal schematisch, links Auslagerung, rechts Einlagerung. 1) Mechanische Schnittstelle Drehmomentabstützung, 2) AMI mit 4) Kinematik zur Bewegung der 5) Trays, 3) Flyer zur Aufnahme von Tray und AMI an die Seilkinematik, 6) Analog zur Auslagerung findet die Einlagerung statt, 7) Durchlaufregalsystem

5 UMSETZUNG

Das Konzept wird in einem Demonstrator der Bauraumgröße 10 m x 4 m x 1,5 m (LxHxT) umgesetzt (vgl. Abbildungen 6 - 8). Die zwei Tragseilpaare sind so aufgehängt, dass sich in der Draufsicht zwischen Aktor und oberer Seilaufhängung zu beiden Seiten des Aktors jeweils eine Trapezform ergibt. Diese dient der Dämpfung von unerwünschten Querschwingungen des Aktors in Richtung der Regalebene und der Reduzierung von Drehschwingungen um die Vertikalachse des Aktors. Das zur Verwendung kommende Tragseil ist in Kern-Mantel-Konstruktion ausgeführt (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2. Konfiguration der Antriebsseile

	Kern	Mantel
Konstruktion	12/1-1 $d_{\text{Kern}} = 2,5 \text{ mm}$ 5 kTex	16/1-1
Material	Technora® T221	Polyester
Flechtwinkel / Flechtlänge	35 ° / 10 mm	
Garnverdrehung	11 °	0 °
Seil		
F_B	2,85 kN	
Arbeitsbereich	< 0,1 x F_B	
d_{nenn}	4 mm	

Der lasttragende Seilkern besteht aus geflochtenem Hochleistungsfaser-Material (Technora®). Als mechanischer Schutz dient ein geflochtener Seilmantel aus abriebfestem Polyester material. Das gewählte Seil hat eine geringe Arbeitsdehnung im Betriebspunkt (aufgrund der verwendeten HM-HT-Fasern) und gute mechanische Dämpfungseigenschaften. Durch den hohen Masseanteil des Seilmantels (Tabelle 2) behält das Tragseil auch nach Kernseilriss seine Tragfähigkeit, da der weniger zugsteife Seilmantel in diesem Fall zusätzlich die Tragfunktion übernehmen kann. Außerdem wird der Aktor (Flyer) an vier unabhängig angeschlagenen Seilsträngen (zwei separate Seilstränge pro Seiltrommel) gehalten. Das System ist so redundant gegen Absturz gesichert.

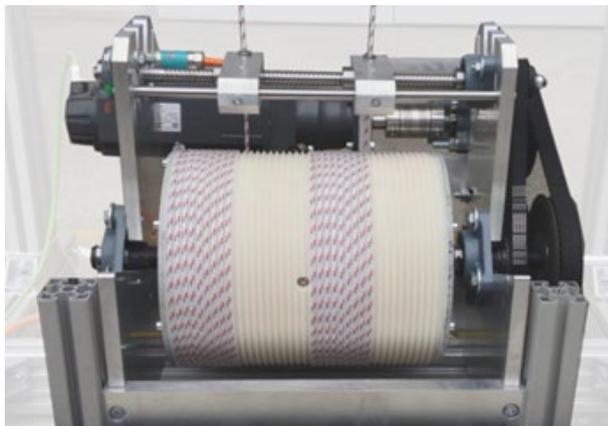


Abbildung 6. Realisierte Trommelwinde als Antrieb von jeweils einem Seilstrangpaar

Die exakte Positionserfassung des Aktors mit einem außenstehenden Messsystem, welches die Aktorposition permanent im Hallenkoordinatensystem erfasst, ist aufgrund der schmalen Gassen sowie vieler möglicher Hindernisse problematisch. Der gewählte Lösungsansatz sieht daher vor, die Grobpositionierung des Aktors gesteuert mit Hilfe einer Reihe mathematischer Modelle zu realisieren. Die Modelle berücksichtigen u.a. die Effekte wie lastabhängiger Seildurchhang und visko-elastisches Kraft-Dehnungs-Verhalten der Tragseile. Zusätzlich wird das Schwingen des Aktors ausgeregelt. Nachdem der Aktor seine Zielposition schwingungsfrei eingenommen hat erfolgt die Feinpositionierung. Dazu wird mit einer handelsüblichen Kamera zur Fachfeinpositionierung die Lageabweichung zwischen Soll- und Ist-Position gemessen und eine entsprechende Korrekturbewegung durchgeführt.

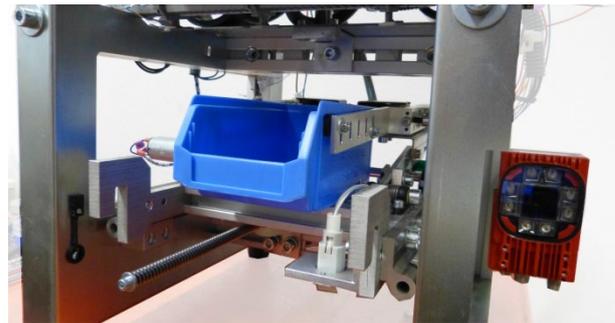


Abbildung 7. Flyer als Greiferbaugruppe zur Entnahme der Systemboxen aus dem Durchlaufregal. Rechts: Kamerasystem zur Fachfeinpositionierung

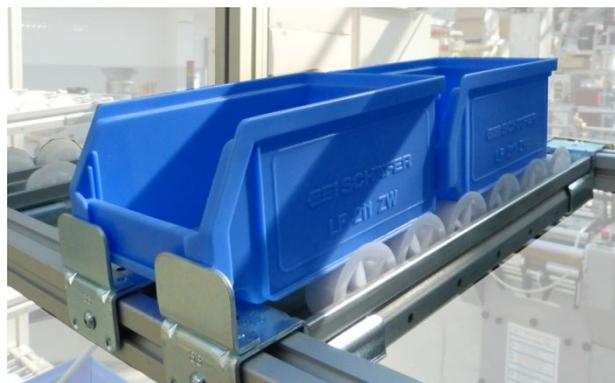


Abbildung 8. Blick in den Demonstrator des Durchlaufregalsystems. Für Prototyp mit doppelter Systemboxtiefe umgesetzt

6 VORLÄUFIGE ERGEBNISSE

Nach Voruntersuchungen und umgesetzten Varianten der Antriebe sowie verschiedener Steuerungsstrategien konnten Achsdynamikparameter von $a_{\text{Seil_max}} = 2 \text{ m/s}^2$ und $v_{\text{Seil_max}} = 2 \text{ m/s}$ erreicht werden. Perspektivisch sind hier Werte bis $a_{\text{Seil_max}} = 5 \text{ m/s}^2$ und $v_{\text{Seil_max}} = 5 \text{ m/s}$ geplant. Nach aktuellen Untersuchungen erscheint es realistisch, dass die angestrebten Werte erreicht werden können. Nach Fertigstellung der Baugruppe Flyer wird ein zyklischer Dauerlauf der kompletten Anlage durchgeführt um das Kurz- und Langzeitstabilitätsverhalten des frei hängenden Aktors bewerten zu können.

Mit einer prototypischen Baugruppe des Seilroboters wurde ein akustischer Vergleich zu einer standardmäßigen reihenkinematischen Zahnriemenachse durchgeführt. Es zeigte sich das erwartete positive Schallemissionsverhalten in einer deutlichen Verringerung des Schalldruckpegels (Abbildung 9).

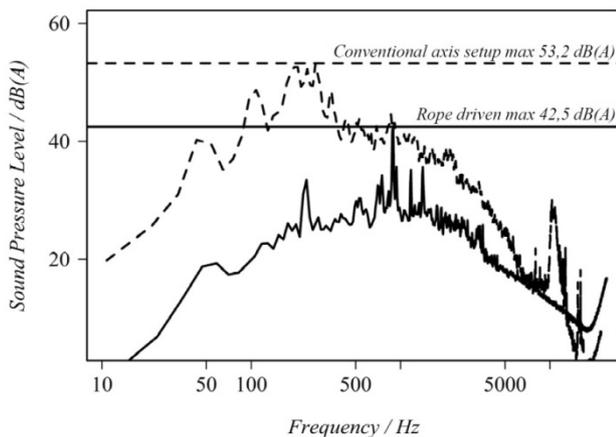


Abbildung 9. Vergleich des emittierten Schalldruckpegels eines konventionellen Linearachsantriebes (Zahnriemen) und eines Faserseil getriebenen Aktors

7 AUSBLICK

Das vorgestellte Beispiel zeigt einen Auszug aus aktuellen Arbeiten des Instituts. Es wird deutlich, dass neue Anwendungen mit Faserseilen möglich sind. Besonders leichte und schnelle Handhabungs- und Förderaufgaben bieten ein großes Potenzial an Einsatzmöglichkeiten, da hier die günstigen Eigenschaften der Faserseile sprichwörtlich zum Tragen kommen. Der vorgestellte Prototyp zeigt die Bestrebung Faserseile in Produktionsmitteln einzusetzen, um einen Beitrag zur Wertschöpfung zu leisten. Dies ermöglicht den Seilherstellern zusätzliche Absatzmöglichkeiten jenseits des Consumer-Bereiches.

8 DANKSAGUNG

Der Dank der Autoren gilt neben den Projektpartnern Gollmann Kommissioniersysteme GmbH und Altratec Automation GmbH selbstverständlich auch dem BMWi für die Projektförderung und der AiF als Projektträger.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



LITERATUR

- [BRU13] Bruckmann T., Pott A.: Cable-Driven Parallel Robots, Mechanisms and Machine Science, Volume 12. 2013, Springer ISBN 978-3-642-31987-7
- [VER04] Verhoeven, R.: Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms, Doctoral Thesis, 2004

Dr.-Ing. Christoph Müller, Leiter der Forschungsgruppe Textile Maschinenelemente am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Christoph Müller wurde 1982 geboren und studierte von 2003 bis 2009 Maschinenbau an der TU Chemnitz und promovierte im Jahr 2015.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz, Telefon: +49 371 531-37989, Fax: +49 371 531-837989, E-Mail: christoph.mueller@mb.tu-chemnitz.de

Dr.-Ing. Markus Helbig, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Markus Helbig wurde 1980 geboren und studierte von 1999 bis 2003 elektrische Kommunikationstechnik an der Hochschule Mittweida und promovierte im Jahr 2013.

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz, Telefon: +49 371 531-35854, Fax: +49 371 531-835854, E-Mail: markus.helbig@mb.tu-chemnitz.de

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Inhaber des Lehrstuhles für Förder- und Materialflusstechnik an der TU Chemnitz studierte von 1991 bis 1997 an der Universität Karlsruhe (TH) Maschinenbau und promovierte im Jahr 2004. Im Zeitraum von 1997 bis 2018 war Markus Golder selbstständig sowie bei verschiedenen auch in leitender Position tätig. Unter Anderem Stahl CraneSystems und Konecranes. Von 2015 - 2018 war er Inhaber der Stiftungsprofessur Sichere mechatronische Systeme der Intralogistik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)

Adresse: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz, Telefon: +49 371 531-23110, Fax: +49 371 531-23119, E-Mail: markus.golder@mb.tu-chemnitz.de

Dipl.-Ing. Wolf Sattler, seit 2012 Leiter Konstruktion bei der Altratec Automation GmbH in Neukirchen. Wolf Sattler wurde 1969 geboren und studierte von 1990 bis 1995 Maschinenbau an der Technischen Universität Ilmenau.

Adresse: Altratec Automation GmbH Südstraße 9, 09221
Neukirchen Telefon +49 371-281 34-22, Fax. +49 371-
281 34-34 E-Mail: w.sattler@altratec.de