

Vergleich von additiv und herkömmlich gefertigten Strukturen für ein neuartiges Regalfahrzeug

Comparison of additive and conventional manufactured structures for an innovative shuttle for rack feeding

*Mathias Rotgeri **
*Marc Dieckerhoff **
*Michael ten Hompel ***

** Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Germany*

*** Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund, Germany*

Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Technische Weiterentwicklungen der Maschinen machen den Einsatz dieser Fertigungsverfahren für Industrieanwendungen immer attraktiver. In einer Untersuchung am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML wurden die Einsatzmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren im Bereich autonomer Regalfahrzeuge analysiert. Die Adaption eines neuartigen Förderfahrzeuges für den Einsatz in Regalanlagen steht hierbei im Fokus der Untersuchung. Diese Analyse stellt die Besonderheiten der additiven Fertigung heraus und vergleicht den Herstellungsprozess mit herkömmlichen Verfahren.

[Stichwörter: Additive Fertigung, Selektives Lasersintern]

In recent years the application of additive manufacturing techniques increased strongly. Significant technical enhancements in this field attract the industrial usage of additive production processes. The Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML analyzed possible applications of additive manufacturing technologies in the field of autonomous shuttle for rack feeding. Within this study the focus concentrates on the adaption of the novel rack shuttle concept. The analysis examines characteristics of the additive manufacturing process and compares them with conventional techniques.

[Keywords: additive manufacturing, selective laser sintering]

1 EINLEITUNG

Additive Fertigungsverfahren bieten viele Vorteile gegenüber klassischen Methoden. Es ergeben sich neue Möglichkeiten bezüglich der Formgebung sowie der Adaption von Funktionsmechanismen aus der Natur. Im Vergleich zu klassischen Fertigungsverfahren kommt die additive Fertigung gänzlich ohne Werkzeuge, Formen oder produktspezifische Vorrichtungen aus, wodurch auch

kleine Stückzahlen sowie kundenindividuelle Produkte wirtschaftlich gefertigt werden können [BBW⁰⁷]. In der Praxis hingegen kommen diese Fertigungsverfahren derzeit noch relativ selten zum Einsatz, daher bedarf es innovativer Forschung, um diese Technologie an den für sie geeigneten Stellen einzusetzen und ihr somit zum Durchbruch zu verhelfen.

Klassische Fertigungsverfahren sind bei der Herstellung autonomer Lagerfahrzeuge bislang vorherrschend. Die Fahrzeuge bestehen in der Regel aus einer geschweißten Tragrahmenkonstruktion mit verschiedenen Anbauteilen. Dies gilt auch für einen im Rahmen der Forschungsarbeiten am Fraunhofer IML entwickelten, neuartigen Förderfahrzeug-Prototyp für den Einsatz in Automatischen Kleinteilelagern, dem RackRacer.

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Fragestellung nach der Eignung sowie den Einsatzmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren im Bereich autonomer Regalfahrzeuge. Zunächst wurden hierzu die Bauteile des vorhandenen Förderfahrzeug-Prototyp analysiert, um die Komponenten zu identifizieren die additiv gefertigt werden können. Anschließend wurden die Komponenten entsprechend eines methodischen Vorgehens zur Bauteilgestaltung modelliert, auf die additive Fertigung hin optimiert und hergestellt. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der herkömmlich und der additiv gefertigten Bauteile sowie der Gesamtfahrzeuge hinsichtlich:

- Funktionsintegration,
- Gewichtsreduktion,
- Bauteilanzahl und
- Herstellkosten.

Zusammenfassend werden die Vor- und Nachteile des Selektiven Lasersinterns für die Erstellung von Funktionsbauteilen im vorliegenden Anwendungsfall erläutert.

2 STAND DER TECHNIK

Im Folgenden wird zunächst die Technik heutiger Regalfahrzeuge, darunter auch der am Fraunhofer IML entwickelte RackRacer kurz vorgestellt. Anschließend werden Eigenschaften der Additiven Fertigung erläutert.

2.1 REGALFAHRZEUGE

Shuttle-Systeme sind statische Zeilenregallager, die von automatischen Fahrzeugen (Shuttle) in den einzelnen Lagerebenen bedient werden [HSN⁺07]. Sie werden eingesetzt, um Lagereinheiten, beispielsweise Behälter, Kartons oder Tablare, in einem Regalsystem zu bewegen. Die von den Fahrzeugen in den Ebenen bewegten Lagereinheiten werden über Vertikalförderer, welche entweder die Lagereinheit oder das gesamte Fahrzeug bewegen, zwischen den einzelnen Lagerebenen transportiert [HH08]. Nach [HSN⁺07] ordnen sich Shuttle-Systeme in den Bereich der Automatischen Kleinteilelager (AKL) ein.

Gegenüber Regalbediengeräten sind Shuttle-Systeme bei großen Lagersystemen tendenziell teurer, bieten jedoch eine deutlich höhere Flexibilität bei Leistungsschwankungen. Auch eine gute Skalierbarkeit ist ein Vorteil dieser Systeme. Da ein Shuttle ein im Vergleich zu einem Regalbediengerät sehr geringes Gewicht besitzt, ist insbesondere das Verhältnis von Nutz- zu Totlast des Systems deutlich günstiger. Dadurch ergibt sich auch eine höhere Energieeffizienz dieser Systeme.

Bei den Komponenten der Fahrzeuge, wie etwa der Energieversorgung, der Steuerung sowie den Antrieben, ist aktuell eine große Vielfalt auf dem Markt zu finden. Unterschiede bei der Umsetzung der etablierten Fahrzeuge existieren häufig aufgrund von Herstellerpatenten. Alle auf dem Markt verfügbaren Shuttle fahren mit einem Fahrwerk auf Schienen im Regal. Am Fraunhofer IML wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Dematic das MultiShuttle entwickelt (vgl. [HSK03] und [KN09]).

2.1.1 RACKRACER

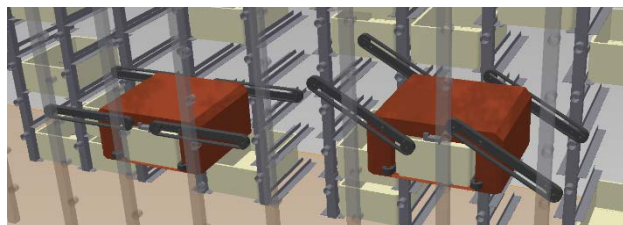


Abbildung 1. RackRacer-System

Der RackRacer ist ein neuartiges Shuttle-System [Sch13]. Es dient wie konventionelle Shuttle-Systeme der automatisierten Ein- und Auslagerung von Lagereinheiten - in diesem Fall Kleinladungsträgern (KLT) - in Regallagern. Dies erfolgt über ein im Fahrzeug montiertes Lastaufnahmemittel (LAM). Im Gegensatz zu konventionellen Shuttle-Systemen können sich die RackRacer selbst-

ständig, d. h. ohne Vertikalförderer oder zusätzliche Schienen, sowohl horizontal als auch diagonal auf- und abwärts im Regal bewegen. Die Fahrzeuge sind somit in der Lage, Ein- und Auslagervorgänge an jeder Position in einem Regal selbstständig durchzuführen. So können Bewegungen innerhalb eines Regals auf direktem Weg zum Lagerort erfolgen. Die diagonale Bewegung im Regal wird durch das neuartige Antriebskonzept ermöglicht, bei dem sich so genannte Raupenelemente auf einzelnen Auflagepunkten im Regal abstützen. Dadurch kann eine Fahrt in horizontaler Richtung sowie in 30° geneigter Richtung auf- und abwärts ausgeführt werden.

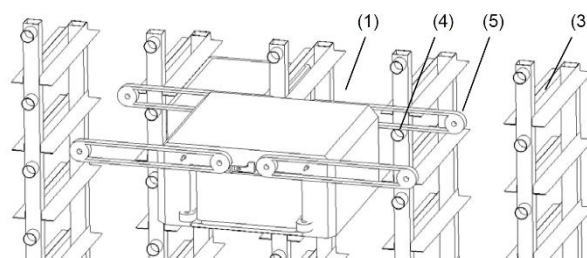


Abbildung 2. (1) RackRacer, (3) Regalzeile, (4) Fahrmasse, (5) Raupenelement

2.2 ADDITIVE FERTIGUNG

Der Begriff *Additive Fertigung* fasst technische Verfahren zusammen, bei denen geometrische Formen schichtweise aufgebaut werden. *Additive Manufacturing* ist die offizielle Bezeichnung im englischsprachigen Raum (vgl. [ASTM2792]), die deutsche Bezeichnung ist in [VDI3404] definiert. Im Folgenden werden die gängigsten in der Industrie eingesetzten Verfahren vorgestellt.

2.2.1 STEREOGRAPHIE (SL)

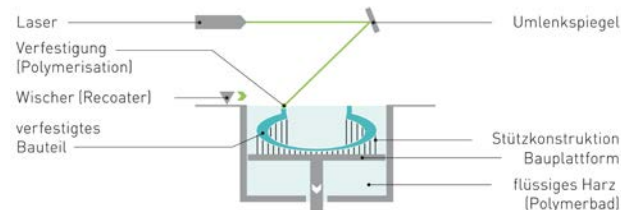


Abbildung 3. Stereolithografie [BBW⁺07]

Die Stereolithografie ist ein Verfahren, bei dem lichtaushärtender Kunststoff (Photopolymer) von einem Laser schichtweise ausgehärtet wird (vgl. Abbildung 3). Dafür befindet sich eine in der Höhe verfahrbare Bauplattform in einem Flüssigkeitsbad. Üblicherweise wird diese Bauplattform im Bad abgesenkt und die Flüssigkeit durch den Laser in dünnen Schichten ausgehärtet. Alternativ kann die Bauplattform auch über Kopf aus dem Bad gezogen werden, sodass ein unter dem in diesem Fall eine Schicht tiefen Flüssigkeitsbad angebrachter Laser für die Aushärtung eingesetzt wird. Nach dem Bauprozess muss das Bauteil gereinigt und mit UV-Strahlung nachverhärtet werden.

2.2.2 POLY-JET MODELING (PJM)

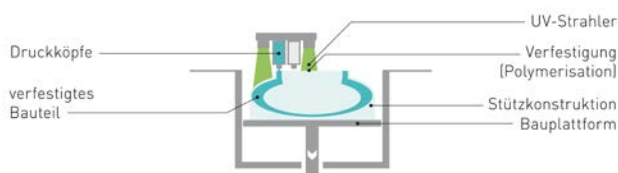


Abbildung 4. Poly-Jet Modeling [BBW⁺07]

Bei diesem Verfahren wird ein Photopolymer auf die Bauplatzform aufgetragen und anschließend lokal mit am Druckkopf angebrachten UV-Lampen ausgehärtet (vgl. Abbildung 4). Die Materialeigenschaften sind denen der Stereolithographie sehr ähnlich, es können jedoch mittlerweile auch mehrere unterschiedliche Materialien in einem Bauteil verarbeitet werden. Für die Herstellung von Überhängen muss eine Stützstruktur mitgedruckt werden, welche nach dem Prozess vom Bauteil entfernt wird.

2.2.3 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

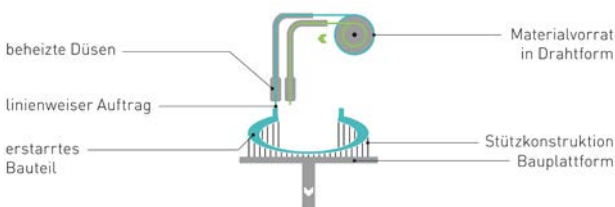


Abbildung 5. Fused Deposition Modeling [BBW⁺07]

Beim Fused Deposition Modeling wird drahtförmiges Material in einer Extrudierdüse aufgeschmolzen und schichtweise aufgetragen, um ein Bauteil zu formen. Es ist eine große Anzahl an Materialien verfügbar, welche durch den parallelen Einsatz mehrerer Extrudierdüsen in einem Bauteil verarbeitet werden können. Neben den häufig eingesetzten Kunststoffen Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polylactid (PLA) sind auch seltener eingesetzte Materialien, wie das wasserlösliche Polyvinylalkohol, Nylon oder fluoreszierende Kunststoffmischungen, verarbeitbar. Bei Überhängen sind Stützstrukturen erforderlich, welche nach dem Prozess entfernt werden müssen.

2.2.4 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM)

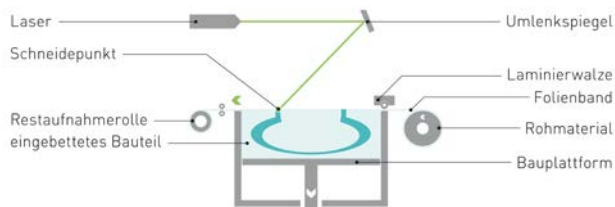


Abbildung 6. Laminated Object Manufacturing [BBW⁺07]

Für die Herstellung von Geometrien werden bei diesem auch als Layer Laminated Manufacturing (LLM) bezeichneten Verfahren Papierschichten oder Kunststofffolien aufeinander verklebt bzw. laminiert und danach

geschnitten. Durch das mittels Laser oder Messer durchgeführte Konturschneiden wird schichtweise ein Objekt erzeugt (vgl. Abbildung 6). Außerhalb der Kontur befindliches Material wird in kleine Würfel zerteilt, damit es nach dem Prozess leichter entfernt werden kann. In der Praxis kommt dieses Verfahren nur noch selten vor.

2.2.5 3D-PRINTING (3DP)

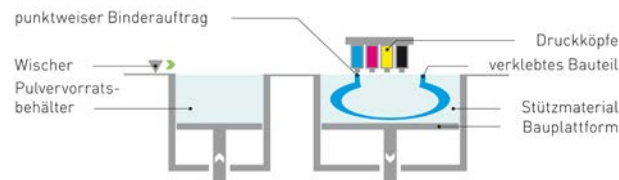


Abbildung 7. 3D-Printing [BBW⁺07]

Beim 3D-Printing wird pulverförmiges Material (Zellulosepulver, Kunststoffpulver oder Gipspulver) schichtweise auf eine Bauplatzform aufgetragen und mit einem Binder selektiv verklebt (vgl. Abbildung 7). Dabei kann das Pulver mit einem konventionellen Tintenstrahl-druckkopf eingefärbt werden, sodass vollfarbige Modelle erstellt werden können. Nachdem eine Schicht selektiv verklebt wurde, wird die Bauplatzform um eine Schichtstärke abgesenkt und der Prozess wiederholt. Für die Erstellung mechanisch belastbarer Bauteile können die Objekte nachträglich z. B. mit Epoxidharz infiltriert werden. Das Bauteil muss nach dem Prozess mittels Druckluft von Pulverresten gereinigt werden. Der 3D-Printing-Prozess kann auch mit Metall- oder Keramikpulver durchgeführt werden, wobei das verklebte Bauteil anschließend erhitzt werden muss, um den Binder auszubrennen.

2.2.6 SELEKTIVES LASERSINTERN (SLS)

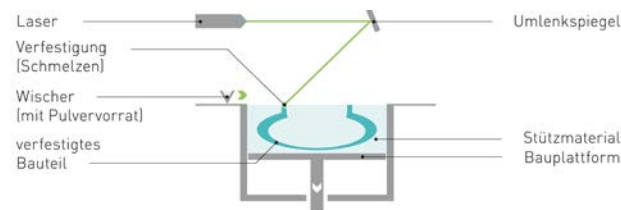


Abbildung 8. Selektives Lasersintern [BBW⁺07]

Beim Selektiven Lasersintern wird pulverförmiges Material schichtweise aufgetragen und mittels Laser gesintert, um Geometrien zu erzeugen (vgl. Abbildung 8). Dabei dient das noch unverschmolzene Pulver während des Druckvorgangs als Stützmaterial und kann nach der Entnahme des Modells für weitere Bauvorgänge zum Großteil wiederverwendet werden (vgl. [BBW⁺07]). Ein Laser schmilzt das Pulver in jeder Schicht selektiv auf, um Bereiche der Bauteile zu verfestigen. Anschließend senkt sich die Bauplatzform ab und eine weitere Pulverschicht wird aufgetragen. Während des Prozesses werden die Bauplatzform und die Prozesskammer der Anlage erwärmt, sodass die durch den Laser einzubringende

Energie geringer sein kann. Dies ermöglicht einen, gegenüber einem Energieeintrag ausschließlich durch den Laser, stabileren und exakteren Prozess. Bei diesem Verfahren können unterschiedliche Materialien verwendet werden. Neben Kunststoffen wie Polyamid (PA), Polystyrol (PS) und Polyetheretherketon (PEEK) bieten die Maschinenhersteller auch mit Kohlefasern oder Aluminium versetzte Pulver an. Nach der Fertigung der Bauteile müssen diese mittels Druckluft gereinigt und die Oberfläche durch Sandstrahlen nachbehandelt werden. Weiterhin lassen sich in speziellen Maschinen auch Metalle selektiv aufschmelzen und zu Bauteilen verarbeiten. Dieses Verfahren heißt entsprechend Selektives Laserschmelzen (selective laser melting - SLM).

3 AUSGEWÄHLTES FERTIGUNGSVERFAHREN

Die beschriebenen Verfahren unterscheiden sich stark voneinander und bieten bei der additiven Herstellung von Bauteilen unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Tabelle 1. *Bewertung der additiven Fertigungsverfahren*

Additives Fertigungsverfahren					
SL	PJM	FDM	LOM	3D-Printing	SLS
Mechanische Eigenschaften					
++--	++--	+++-	++--	----	++++
Thermische Eigenschaften					
----	----	+++-	++--	+++-	+++-
Genauigkeit					
++++	++++	----	++--	++--	++--
Reinigungsaufwand					
+++-	++--	+++-	++--	++--	++--
Nachbereitung					
++--	+++-	+++-	++--	----	++++
Oberflächenbearbeitung					
++--	+++-	----	++--	++--	++--
Anzahl positiver Wertungen					
12	12	12	10	7	16

nach [BBW⁺07]

Aufgrund der unterschiedlichen Genauigkeiten, der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Materialvielfalt ist eine eindeutige Auswahl des geeigneten Verfahrens schwierig. Hinzu kommen unterschiedliche Aufwände bezüglich der Reinigung und Nachbearbeitung der Bauteile sowie die Möglichkeit der Oberflächenbearbeitung. Tabelle 1 zeigt eine qualitative Bewertung der Verfahren hinsichtlich der beschriebenen Eigenschaften entsprechend [BBW⁺07]. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens hängt jedoch immer auch von den jeweiligen Anwendungsfällen ab, da diese unterschiedliche Anforderungen an den Fertigungsprozess haben können. Im betrachteten Anwendungsfall sind

- die mechanischen Eigenschaften,
- die thermischen Eigenschaften und
- die Genauigkeit der Bauteile

von besonderer Bedeutung.

Die Bauteile müssen ausreichend mechanisch belastbar sein, da ein voll funktionsfähiger, additiv gefertigter Prototyp des neuartigen Regalfahrzeuges gefertigt werden soll. Die thermische Belastung der Bauteile wird durch die Verwendung von Elektromotoren hervorgerufen, die im Betrieb eine Wärmeentwicklung aufweisen. Die Bauteile müssen somit dieser Belastung standhalten und dürfen durch die Wärmeeinwirkung nicht in ihren mechanischen Eigenschaften beeinträchtigt werden. Die additiv gefertigten Bauteile müssen zudem eine hinreichende Genauigkeit aufweisen, um einen zusätzlichen Nachbearbeitungsaufwand zu vermeiden.

Aus Tabelle 1 lässt sich das selektive Lasersintern, aufgrund der mechanischen sowie thermischen Eigenschaften, als am besten geeignetes Verfahren identifizieren. Die Genauigkeit des Verfahrens ist zwar z. B. im Vergleich zur Stereolithografie ungenauer, aber mit einer Genauigkeit von ca. ±0,1 mm hinreichend genau. Beim selektiven Lasersintern lässt sich letztlich noch zwischen der Verwendung von Kunststoff oder Metall unterscheiden. Die Gewichtsreduktion sowie die Betrachtung der Herstellkosten gehören zu den übergeordneten Vergleichskriterien zwischen dem additiv und dem herkömmlich gefertigten RackRacer. Um mögliche Vorteile der additiven Fertigung nutzen zu können, wurde das kunststoffbasierte Selektive Lasersintern als zu verwendendes Verfahren ausgewählt.

4 METHODISCHES VORGEHEN

Dieses Kapitel behandelt die Methodik der Konstruktion der additiv gefertigten Bauteile des RackRacer. Hierzu wurde ein, die gestalterischen Freiheiten des Fertigungsverfahrens berücksichtigendes, vierphasiges Vorgehen entwickelt und angewendet, das im Folgenden erläutert wird.

4.1 ANALYSE

Da der *SLS-RackRacer* auf einem vorhandenen Prototyp des RackRacer aufbaut, wird dieser zunächst analysiert. Dazu werden die Baugruppen des Prototyps einzeln betrachtet und anhand definierter Analysekriterien untersucht. Der RackRacer ist unterteilt in sieben Baugruppen, die in Abbildung 9 dargestellt sind. Durch die Analyse können potentiell kritische Teile sowie ein mögliches Potential zur Optimierung und Funktionsintegration der Bauteile und -gruppen früh im Adaptionsprozess identifiziert werden. Die verwendeten Analysekriterien sind in Tabelle 2 aufgelistet.

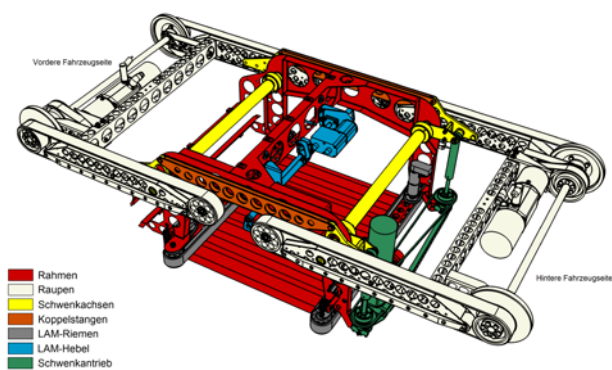


Abbildung 9. RackRacer – Erster Prototyp

Die durchgeführte Analyse gibt einen Überblick über die einzelnen Aspekte der Konstruktion des RackRacer. Mit den Ergebnissen der Analyse lassen sich die weiteren Schritte der Adaption des Fahrzeugs planen. Zwischen den einzelnen Baugruppen sind einige Verbindungen zu erkennen, auf die bei der Verwendung von Kunststoff als Material besondere Rücksicht genommen werden muss. Große Kräfte sind an vergleichsweise wenigen Stellen zu erwarten. Dafür muss an diesen mit innovativen Konstruktionslösungen dafür gesorgt werden, dass der Werkstoff nicht überlastet wird. An einigen Stellen, wie beispielsweise der Verbindung Raupe-Schwenkachse, lässt sich Potential zur Kombination beider Baugruppen erkennen. Da die additive Fertigung auch komplexe

Konstruktionen zulässt, die mit konventionellen Methoden nur unter großem Aufwand zu fertigen sind, bieten sich an diesen Stellen integrierte Lösungen an.

Tabelle 2. Analysekriterien

Konturvorgaben	Dehnung und Kompression
Biegung	Flächenpressung
Tribologische Oberflächenbeanspruchung	Torsion
Wärmequellen	Besonderheiten
Verschmutzung	

Insgesamt zeigt die Analyse viele unkritische Bereiche, welche mit relativ geringem Aufwand adaptiert werden können. Bereiche, in denen hohe Flächenpressungen oder starke Biegung zu erwarten sind, müssen dagegen mit besonderer Sorgfalt beachtet werden. Eine Übersicht über die Analyseergebnisse bietet Tabelle 3. In dieser sind die untersuchten Baugruppen nach Kriterien aufgeschlüsselt und jeweils objektiv bewertet dargestellt. Es werden ausschließlich die im RackRacer-Prototyp vorhandenen Kriterium-Baugruppe-Kombinationen bewertet.

Tabelle 3. Analyseübersicht RackRacer

Kriterium	Baugruppe								
		Rahmen	Raupe	Schwenkachse	Koppelstange	Spindeltrieb	LAM-Riemen	LAM-Haken	Lastübergabe-sensorik
Konturvorgaben		–	–	○	+	+	○	○	+
Dehnung und Kompression		+	○		–	+	+		
Biegung		○	–	○				○	
Flächenpressung		–	–	–	–	–			
Tribologische Oberflächenbeanspruchung		+	+			–	+	–	
Motorbefestigungen (Wärmeauswirkung)		○	○						
Verschmutzung von beweglichen Komponenten			+			+	+	○	
Besonderheiten			○			○	○	○	
		+ unkritisch		○ neutral	– kritisch				

Ohne weitere Untersuchungen während des Konstruktionsprozesses lässt sich nur schwer vorhersagen, ob eine vollständig aus Polyamid bestehende Struktur tragfähig im Hinblick auf die Gesamtmasse des Fahrzeuges ist. Daher ist bei unzureichender Festigkeit die hybride Verwendung von Kunststoff zusammen mit einem steiferen Werkstoff wie etwa CFK zu analysieren. Es ist zu erwarten, dass die neue Konstruktion die Masse und somit auch die auftretenden Kräfte signifikant reduzieren können. Je nach abschließender Gewichtsersparnis können möglicherweise kleinere Antriebe verwendet werden, welche das Gewicht weiter reduzieren.

4.2 TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

Erster Bestandteil dieser Konstruktionsphase ist eine softwareunterstützte Topologieoptimierung, um den Kraftfluss innerhalb verschiedener Bauteile zu visualisieren und danach zu optimieren. Hierzu wird ein Modell (Bauraumobjekt) jedes Bauteils ausgearbeitet, welches dem maximal zur Verfügung stehenden geometrischen Bauraum entspricht (vgl. Abbildung 10). Positionen, an denen Funktionen erfüllt werden, werden mit nicht veränderbaren Hilfsobjekten aus einfachen geometrischen Formen dargestellt. Die Objekte werden mit zu erwartenden Kräften und Momenten beaufschlagt. Zudem werden maximal zulässigen Verschiebungen definiert und an den Hilfsobjekten angetragen.

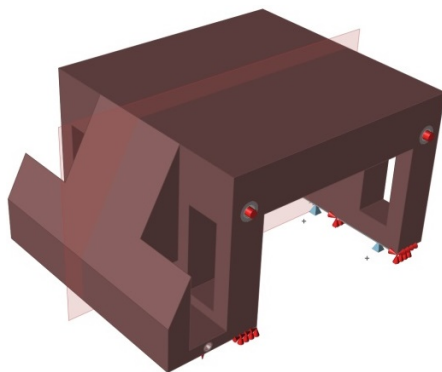


Abbildung 10. Bauraumobjekt (Rahmen)

Anschließend werden softwareunterstützt iterativ Bereiche im Bauraum ermittelt und entfernt, die für den Kraftfluss vernachlässigt werden können. Dabei stehen zwei Optimierungsmodi zur Auswahl, die unterschiedliche Abbruchkriterien enthalten. Im ersten Modus wird solange Material vom Bauteil entfernt, bis die vorgegebenen maximalen Verschiebungen bei den angegebenen Kräften überschritten werden. Dem zweiten Modus kann ein Prozentanteil des Bauraumobjektvolumens vorgegeben werden, welcher maximal verwendet werden darf. Dabei wird die Struktur mit dem vorgegebenen Volumen ermittelt, welche die angegebenen Kräfte am besten aufnehmen kann. Anschließend wird angegeben, ob die vorgegebenen Verschiebungsbeschränkungen eingehalten werden. Nach der Optimierung wird ein Topologieobjekt ausgegeben, welches die vorgegebenen

Anforderungen mit einer definierten Sicherheit erfüllt (vgl. Abbildung 11).

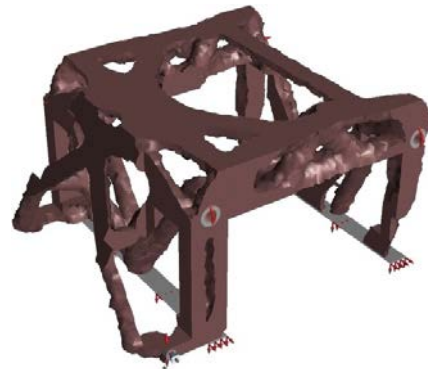


Abbildung 11. Ergebnis mit rauer Oberfläche (Rahmen)

Das Topologieobjekt weist aufgrund einer groben Gitterauflösung, die aus Rechenkapazitätsgründen gewählt wurde, eine raue Oberfläche auf. Diese wird zur weiteren Verwendung im CAD-Programm geglättet (vgl. Abbildung 12). Diese Bearbeitung hat das Ziel, ausgeprägte Streben im Bauteil und damit wichtige Kraftflüsse deutlicher nachzubilden. Zudem können fehlerhafte Strukturen des optimierten Bauteils repariert werden.



Abbildung 12. Geglättetes Ergebnis (Rahmen)

4.3 MODELLIERUNG

Das vollständig aufgearbeitete Topologieobjekt dient als Basis der Konstruktion. Das Bauteil soll den Belastungen entsprechend kraftflussoptimiert gestaltet sein und damit der Topologieoptimierung folgen. Dies erfordert ein hohes Maß an Freiformflächen und Rundungen. Es bieten sich mehrere Ansätze zur Modellierung des Bauteils im CAD-Programm an. Beim *SLS-RackRacer* werden die Rahmenbauteile aus einzelnen Verstrebungen aufgebaut, die individuell modelliert werden. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Nachgestaltung des Kraftflusses. Ebenso können nachträgliche Änderungen lokal im Bauteil mit überschaubarem Aufwand durchgeführt werden. Nach der Modellierung der Rahmenstreben werden die detaillierten Funktionselemente angefügt. Abbildung 13 zeigt die Konstruktionsabfolge in neun Schritten.

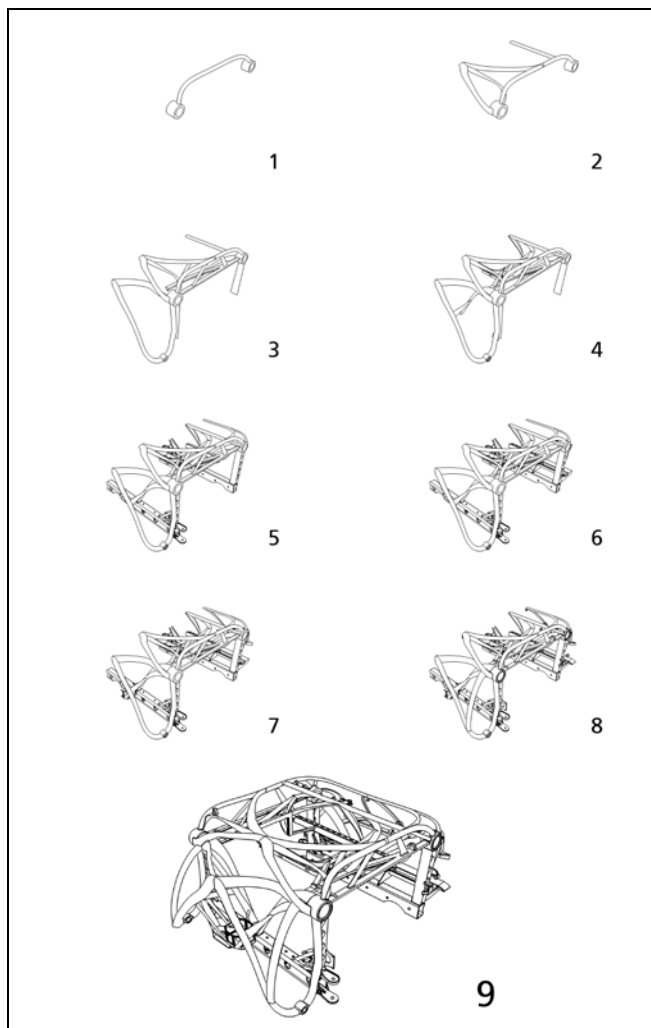


Abbildung 13. Modellierung – Konstruktionsabfolge

Nach der Erstellung eines ersten Modells wird dessen Gewicht überprüft. Anschließend wird, durch Verändern der Materialstärke und Verwendung von Leichtbaustrukturen, das Gewicht reduziert, bis ein akzeptabler Bereich erreicht ist. Dieser iterative Prozess ist in einer TOTE-Einheit (vgl. [PBF⁺07]) in Abbildung 14 dargestellt. Nach erfolgreicher Anpassung der Topologieoptimierung werden die Funktionselemente des Modells überarbeitet und an die anderen Bauteile angepasst.

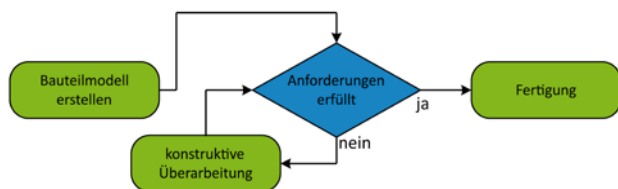


Abbildung 14. TOTE-Einheit

Da das Bauvolumen der Sintermaschine begrenzt ist, müssen einige Bauteile unterteilt und in mehreren Einzelteilen gefertigt werden sowie zusätzliche Montageelemente für ein anschließendes Zusammenfügen erhalten. Die Bauteile werden nach dem Sintern durch

Verkleben wieder zu einem Bauteil zusammengefügt. Idealerweise wird durch Verkleben der Bauteile eine ausreichend hohe Festigkeit erzeugt. Da dies zum Teil an hoch belasteten oder schlecht zugänglichen Stellen nicht möglich ist, wurde die Möglichkeit geschaffen, die Bauteile zusätzlich zu verschrauben.

4.4 OPTIMIERUNG DER FERTIGUNG

Die Kosten von Bauteilanpassungen steigen bei der Fertigung mit additiven Verfahren in späten Entwicklungsphasen deutlich geringer an, als dies bei konventionellen Verfahren der Fall ist (vgl. Abbildung 15). Dies liegt unter anderem daran, dass für die Fertigung der Bauteile keine individuellen Werkzeuge erstellt werden müssen und Anpassungen eingepflegt werden können, ohne dass andere Bauteile verändert werden müssen. Dieses Potential ermöglicht es mit vergleichsweise geringen Kosten Produktelemente real zu testen und diese anschließend anzupassen und zu optimieren.



Abbildung 15. Kosten von Veränderungen während der Produktentwicklung aus [BBW⁺07]

Nach der fertiggestellten Modellierung des Rahmenbauteils werden daher Bereiche, in denen Teilfunktionen separat getestet werden können, herausgeschnitten und lasergesintert. Dies bietet sich besonders für große Bauteile an, die in Teilbereichen hoch belastet werden oder genau sein müssen. Mit diesen Testobjekten kann kostengünstig überprüft werden, ob die Bereiche den Anforderungen genügen oder ob die Konstruktion angepasst werden muss. Insbesondere bei Bauteilelementen mit Passungen und zueinander beweglichen Funktionselementen sind mitunter mehrere Optimierungsschritte nötig.

In diesem Schritt werden die gefertigten Bauteile bereits in der Testphase gewogen und das Gewicht mit den Angaben aus dem CAD-Programm verglichen. Hierdurch können die Zielparameter hinsichtlich des zulässigen Gesamtgewichts verifiziert werden. Nachdem entsprechende Teilbereiche eines Bauteils überarbeitet worden sind, wird der erste vollständige Prototyp gefertigt und montiert. Dabei werden die Toleranzen der lasergesinterten Füge- und Funktionselemente überprüft und diese bei zu starken Abweichungen nochmals im Modell angepasst.

Die Produktentwicklung kann bei komplexen Bauteilen einige dieser Optimierungsschritte durchlaufen. Sie lässt sich daher als Zyklus darstellen, welcher mehrfach durchlaufen werden muss, um die benötigte Qualität des Produktes zu erzielen. In Abbildung 16 ist ein vereinfachter Zyklus der Produktentwicklung dargestellt.

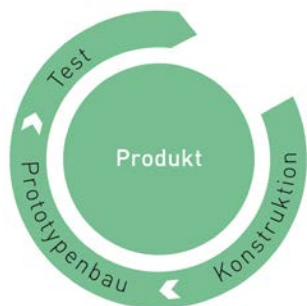


Abbildung 16. Vereinfachter Zyklus der Produktentwicklung aus [BBW⁺07]

5 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden Ergebnisse der Realisierung des *SLS-RackRacer* vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf das Potential der Funktionsintegration und die resultierenden Vorteile eingegangen sowie die Herstellkosten der additiv gefertigten Bauteile aufgeschlüsselt. Die Daten des *SLS-RackRacer* werden dafür mit denen der bestehenden konventionell gefertigten Prototypen *RackRacer v1* und *RackRacer v2* (vgl. Abbildung 17) verglichen.

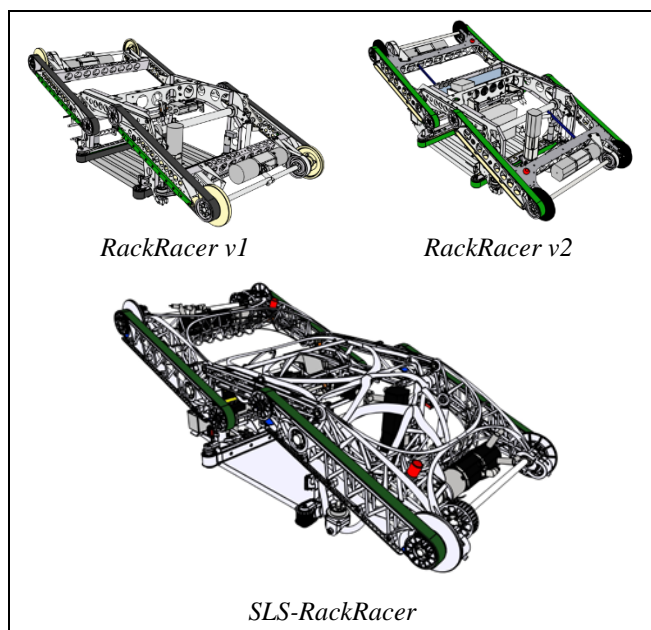


Abbildung 17. RackRacer-Prototypen

5.1 FUNKTIONSINTEGRATION

Aufgrund der großen gestalterischen Freiheiten bei der additiven Fertigung, lassen sich Bauteile mit komplexen Geometrien ohne Mehraufwand realisieren. Die Integration vieler Funktionen in einzelne Bauteile ist somit in erhöhtem Maße möglich. Diese Funktionsintegration führt beim *SLS-RackRacer* zu Vorteilen im Bereich der Bauteilanzahl sowie der Gesamtmasse des Fahrzeugs.

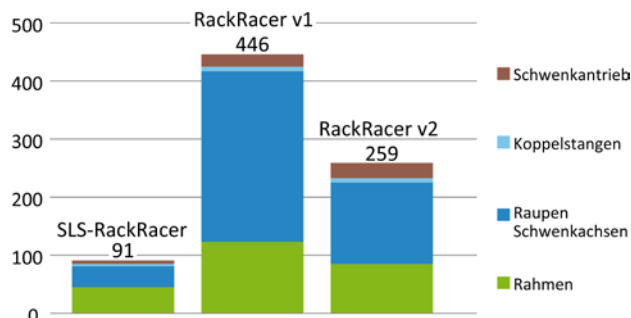


Abbildung 18. Bauteilanzahl RackRacer-Varianten

Durch die additiv gefertigten Bauteile kann die Anzahl der Einzelteile und damit beispielsweise der Montageaufwand signifikant reduziert werden (vgl. Abbildung 18). Im vorliegenden Fall des *SLS-RackRacer* kann die Anzahl von 446 beim *RackRacer v1* und 259 beim *RackRacer v2* auf 91 Einzelteile reduziert werden. Dies lässt sich auf die Komplexität der Bauteile zurückführen, die additiv hergestellt wurden. Insbesondere die Schweißbaugruppen der konventionell hergestellten RackRacer-Varianten enthalten eine große Anzahl von Einzelteilen.

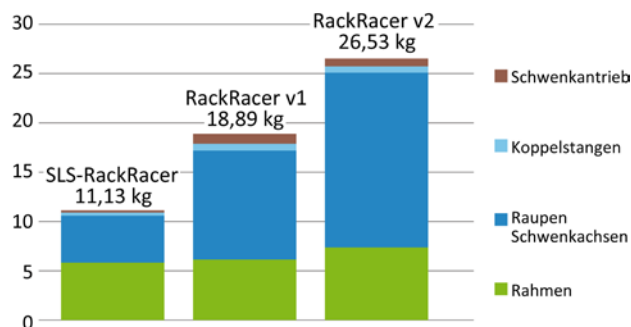


Abbildung 19. Masse RackRacer-Varianten

Die Masse der analysierten Bauteile konnte ebenfalls reduziert werden (vgl. Abbildung 19). Die additiv gefertigten Bauteile des *SLS-RackRacer* wiegen 11,13kg, während die entsprechend konventionell gefertigten Bauteile des *RackRacer v1* 18,89kg und die des *RackRacer v2* 26,53kg wiegen.

5.2 ZUSAMMENSETZUNG DER HERSTELLKOSTEN

Die Herstellkosten der untersuchten RackRacer-Varianten besitzen eine vergleichbare Größenordnung. Hierbei ist jedoch festzustellen, dass der *SLS-RackRacer* im Vergleich zum *RackRacer v2* eine weitaus größere Abhängigkeit von den Materialkosten aufweist (vgl. Abbildung 20). Die Materialkosten des *SLS-RackRacer* machen 77,5% der Herstellkosten aus, gegenüber 3,2% beim *RackRacer v2*. Die Herstellkosten des *RackRacer v2* ergeben sich hingegen zu etwa 96,8% aus den Fertigungskosten und Kosten für Auftragsarbeiten. Demgegenüber zu stellen sind die Maschinen- und Handhabungskosten additiv gefertigter Bauteile entsprechend der Methode

Einzelkalkulation (vgl. Kapitel 5.2.1) je nach Bauteiltyp einem Anteil von etwa 15% bis 25%.

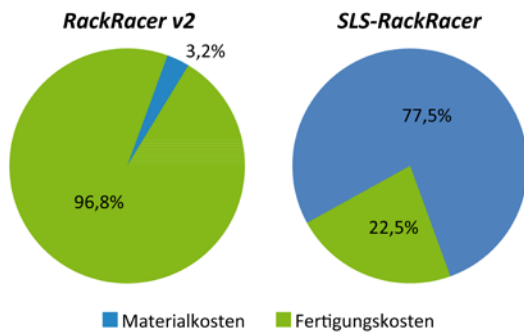


Abbildung 20. Vergleich der RackRacer-Herstellkosten

5.2.1 BESTIMMUNG DER MATERIALKOSTEN BEI SELEKTIVEM LASERSINTERN

Das Material liegt beim Selektiven Lasersintern in Pulverform vor und wird im Prozess zu gewünschten Geometrien verschmolzen. Die Dichte des Pulvers ändert sich dabei durch das Verschmelzen von ca. 430 kg/m³ auf etwa 930 kg/m³. Die Komplexität der Geometrien beeinflusst die Kosten dieses Prozesses bei gleichbleibendem Volumen des Bauteils in einer zu vernachlässigenden Größenordnung. In die Materialkosten einbezogen werden muss jedoch nicht ausschließlich das gesinterte Material der Bauteile, sondern auch das an den Bauteilen prozessbedingt anhaftende Pulver (vgl. Abbildung 21). Dieses kann aufgrund einer ebenfalls prozessbedingten Temperaturschädigung nicht wiederverwendet werden. Das übrige nicht verbrauchte Pulver (Altpulver) muss in einem empfohlenen Mischverhältnis von 1:1 (Neu- zu Altpulver) wiederverwendet werden. Dieses Mischverhältnis dient der Heterogenisierung der Schmelztemperatur des im Prozess befindlichen Pulvers.

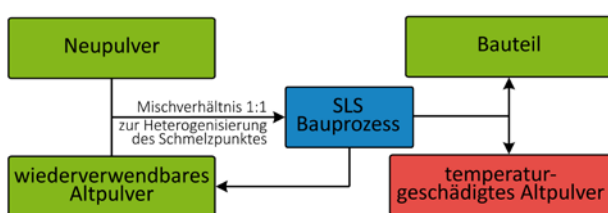


Abbildung 21. Prozessdiagramm SLS

Die Menge des anhaftenden Pulvers sowie des nicht für andere Bauteile belegbaren Bauraums hängt stark von den Geometrien ab. Bei Bauteilen mit einfachen, beispielsweise quaderförmigen Geometrien, haftet im Vergleich zu komplexen Bauteilen, wie etwa den Rahmenelementen des *SLS-RackRacer*, oftmals weniger Pulver an. Die Materialkosten wurden daher mit einem eigens entwickelten Berechnungsmodell ermittelt. Dieses Modell bestimmt anhand eines die Geometrie des Bauteils beschreibenden Bauteiltyps das Bauteilvolumen (verschmolzener Anteil) sowie das Hüllkörpervolumen (temperaturgeschädigtes Altpulver). Dadurch lassen sich

die Menge des verbrauchten Kunststoffpulvers und somit die entsprechenden Materialkosten hinreichend genau bestimmen.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem entwickelten *SLS-RackRacer* konnte demonstriert werden, dass große und hochbelastete Bauteile mit additiven Fertigungsverfahren herstellbar sind. Die entwickelte Konstruktionsmethodik ermöglichte eine kraftflussoptimierte Gestaltung der Rahmenbauteile des *SLS-RackRacer*, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind. Die großen Rahmenelemente konnten mit einer geeigneten Methode zerteilt und dadurch mit der verfügbaren Sintermaschine gefertigt und anschließend wieder zusammengefügt werden.

Das Gewicht des *SLS-RackRacer* liegt deutlich unter dem Gewicht der konventionell gefertigten Varianten, während die Herstellkosten beider Fahrzeuge sich in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Dies begründet sich vorrangig in der kraftflussoptimierten Gestaltung der Rahmenbauteile. Auch die Menge der Einzelteile konnte beim *SLS-RackRacer* durch die Integration mehrerer Funktionen in einzelne Bauteile deutlich reduziert werden.

Im Rahmen dieser Studie konnten Möglichkeiten und Grenzen des Selektiven Lasersinterns identifiziert werden. Insbesondere bei komplexen Bauteilen zeigt die additive Fertigung große Vorteile gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren. Die Grenzen des Verfahrens ergeben sich bei der Fertigung großer Bauteile und Passungen.

7 AUSBLICK

Die ausgearbeiteten Bauteile des *SLS-RackRacer* bieten Potential und auch die Notwendigkeit für weitere Detailuntersuchungen. Beispielsweise ist es erforderlich, ein optimiertes Konzept für das, möglicherweise auch automatisierte, Zerteilen großer Bauteile zu entwickeln, mit dem diese zuverlässig und mit geringem Aufwand gefertigt und montiert werden können.

Durch die Gewichtsreduktion aufgrund der Kunststoffbauteile verringern sich die auftretenden Kräfte im *SLS-RackRacer* gegenüber den konventionell gefertigten *RackRacer* deutlich. Es ist zu prüfen, ob der Einsatz kleinerer und leichter Antriebsmotoren möglich ist, welche das Gesamtgewicht weiter reduzieren können.

Das Methodische Vorgehen zur Konstruktion additiv gefertigter Bauteile ermöglicht die Entwicklung innovativer Lösungen. Für zukünftige Konstruktionen ist der Einsatz von computergestützten Simulationen der Bauteileigenschaften unter Belastung zu überprüfen.

LITERATUR

- [PBF⁺07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 7. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2007. - ISBN 978-3-540-34060-7
- [Sch13] Schutzrecht DE 10 2013 006 391.4 (2013). Schroer, Winfried (Erfinder); Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Anmelder).
- [HSN⁺07] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thors-ten; Nagel, Lars; Jünemann, Reinhardt: *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2007. - ISBN 978-3-540-73235-8
- [HH08] ten Hompel, Michael; Heidenblut, Volker: *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 2008. - ISBN 978-3-540-75661-3
- [BBW⁺07] Breuninger, Jannis; Becker, Ralf; Wolf, Andreas; Rommel, Steve; Verl, Alexander: *Generative Fertigung mit Kunststoffen*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 2007. - ISBN 978-3-642-24324-0
- [ASTM2792] American Society for Testing and Materials: *ASTM 2792 – Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, 2009
- [HSK03] ten Hompel, M.; Schönbeck, J.; Kunder, R.: Multishuttle. In: *Tagungsband der 21. Dortmunder Gespräche 2003 "Brennpunkt Materialfluss" (2003)*
- [KN09] Klein, M.; Neuhaus, R.: Die Zukunft der Intralogistik – Premiere des Multishuttle Move in Offenbach – Autonome FTF-Schwärme lösen traditionelle Fördertechnik ab. In: *Logistik entdecken (2009)*, Nr. 9, S. 18
- [VDI3404] Verein Deutscher Ingenieure VDI: *VDI-Richtlinie 3404: Additive Fertigung – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Düsseldorf: Beuth-Verlag, 2014

Mathias Rotgeri, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund. Mathias Rotgeri wurde 1989 in Dortmund geboren. Er studierte zwischen 2008 und 2014 Maschinenbau an der Technischen Universität Dortmund.

Telefon: +49 231 9743-335, Fax: +49 231 9743-77-335, E-Mail: mathias.rotgeri@iml.fraunhofer.de
Anschrift: (1)

Dipl.-Ing. Marc Dieckerhoff, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund. Marc Dieckerhoff wurde 1978 in Schwerte geboren. Er ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund.

Telefon: +49 231 9743-147, Fax: +49 231 9743-77-147, E-Mail: marc.dieckerhoff@iml.fraunhofer.de
Anschrift: (1)

Prof. Dr. Michael ten Hompel ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Universität Dortmund und geschäftsführender Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und promovierte an der Universität Witten/Herdecke.

Telefon: +49 231 97 43-600,
E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de
Anschrift: (2)

Anschriften:

1)
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML,
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4, 44227 Dortmund

2)
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen,
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, LogistikCampus,
44227 Dortmund.