

# ENERGIEEFFIZIENTE INTRALOGISTIK AUF GERÄTEEBENE - BEISPIEL REGALBEDIENGERÄT

Dipl.-Ing. Rainer Ertl, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A Günthner, Dipl.-Ing. Gabriel Fischer (Lehrstuhl fml, Technische Universität München), Dipl.-Ing. Paul Hahn-Woernle (viastore systems GmbH)

## 1 Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz 1.1 Bedeutung in der Intralogistik

Die Klimaveränderung, steigende Energiepreise und immer strengere gesetzliche Auflagen haben die Energieeffizienz mittlerweile als zentrales Thema auch in der Intralogistik etabliert. Dies hat Auswirkungen auf die Anforderungen an Logistiksysteme und somit auch auf Fördermittel wie Regalbediengeräte (RBG). Trotz des hohen Einsparpotenzials ist die Energieeffizienz intralogistischer Anlagen in der Planungsphase derzeit jedoch kaum von Bedeutung, da handfeste und konkrete Zahlen zu Energieverbräuchen und Einsparpotenzialen oft nicht vorhanden sind. So werben zwar viele Anbieter mit der Energieeffizienz ihrer Produkte, genaue Angaben zu Energieverbräuchen sind jedoch oft nicht verfügbar. Um belastbare Zahlen zu Energieverbräuchen zu gewinnen, werden in einem Gemeinschaftsforschungsprojekt zwischen dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) und der viastore systems GmbH die Zusammenhänge zur Entwicklung eines hochleistungsfähigen und zugleich energieeffizienten Regalbediengerätes eingehend untersucht.

## 1.2 Energieeffizienz bei Regalbediengeräten

Energieeffizienz lässt sich bei Regalbediengeräten zum einen auf elektrischer Seite durch den Einsatz einer elektronischen Drehzahlregelung sowie einem intelligenten Energiemanagement erreichen. Zum anderen kann besonders auf mechanischer Seite ein beachtliches Energieeinsparpotenzial ausgemacht werden. Dieses beruht auf einer signifikanten Massenreduzierung der Tragwerkstruktur des Geräts mittels moderner Leichtbauweisen. Nach [1] beträgt der Energieanteil zum Bewegen allein des Fördermittels bei typischen Regalbediengeräten deutlich über 90%. Zur Reduzierung der bewegten Totmasse gilt es, ein wirtschaftliches Optimum zwischen dem Grad der Leichtbauanstrengungen und den resultierenden höheren Material- und Fertigungskosten zu finden. Die Amortisationszeit von Leichtbau-Mehrkosten muss dabei in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden.

## 2 Simulationsmodell

### 2.1 Struktur des Simulationsmodells

Zur Berechnung des Energieverbrauchs hat der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik ein computergestütztes Berechnungsmodell aufgesetzt. Mit diesem können die komplexen mathematischen Zusammenhänge mit

ihrer Vielzahl an Einflussgrößen schnell und flexibel parametergesteuert analysiert werden. Bei der Implementierung des Simulationsmodells wird besonders auf durchgängige Parametrisierung der Einflussgrößen geachtet, so dass in Abhängigkeit der technischen und betrieblichen Eigenschaften der Energiebedarf eines Regalbediengeräts ermittelt werden kann. Um im Bereich der Geräteeentwicklung die Effektivität einzelner Konzeptvarianten ausreichend beurteilen zu können, gilt es, die Anteile sowohl für Fahr- als auch für Hubbewegungen am Gesamtenergiebedarf zu ermitteln. Als Implementierungsplattform wird die Simulationsumgebung MATLAB/Simulink gewählt. Das Simulationsmodell ist in verschiedene Systemblöcke aufgliedert, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

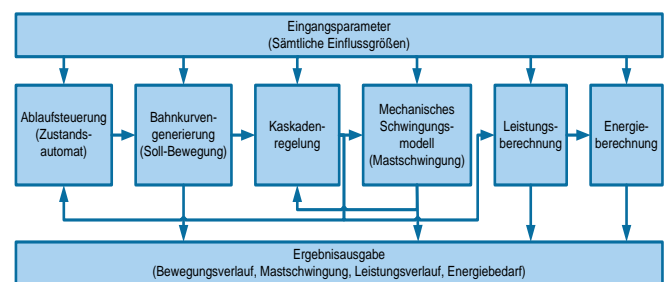


Abbildung 1: Struktur des Simulationsmodells (Quelle: fml)

Über Eingangsparameter werden alle für die Simulation relevanten Einflussgrößen definiert, u.a. auch die Vorgabe entsprechender Auftragslisten, die während der Simulation abgearbeitet werden. Die Simulationsergebnisse werden strukturiert abgelegt und zusätzlich grafisch dargestellt.

### 2.2 Bahnkurvengenerierung

Die Bahnkurvengenerierung berechnet aus den Eingangsparametern wie maximaler Beschleunigung und Geschwindigkeit die Bahnkurve zwischen Start- und Zielposition für die einzelnen Verfahrensmäner. Ein vollständiges Verfahrensmäner besteht dabei aus sieben Phasen entsprechend Abbildung 2 mit

- vier Phasen mit positivem bzw. negativem Ruck,
- zwei Phasen mit konstanter Beschleunigung bzw. Verzögerung und
- einer Phase mit konstanter Geschwindigkeit.

Ein Algorithmus berechnet den zeitlichen Verlauf des Rucks, wodurch mittels mehrfacher Integration die Soll-Bewegung des Fahrzyklus' beschrieben wird. Die Bahnkurvengenerierung berücksichtigt ebenfalls sämtliche Sonderfälle, in denen aufgrund der Kürze des zurückzule-

genden Weges keine vollständige 7-Phasen-Fahrt stattfinden kann.

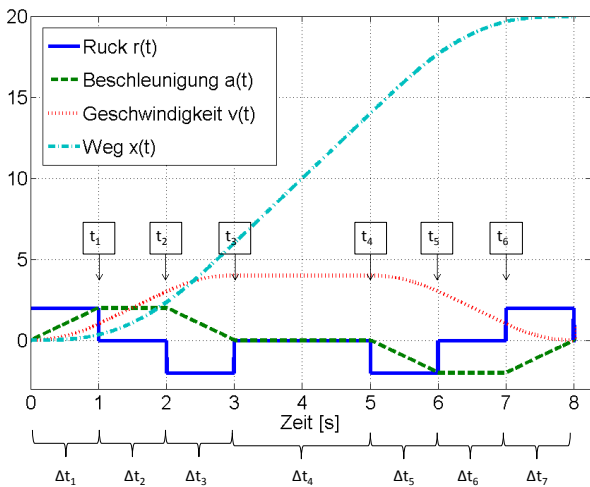


Abbildung 2: Vollständiges Positioniermanöver mit sieben Phasen (Quelle: fml)

### 2.3 Kaskadenregelung und mechanisches Schwingungsmodell

Die Umrechnung dieser Soll-Bewegungsdaten hin zu Vorgaben von Soll-Drehzahl und -Drehmoment erfolgt unter Berücksichtigung der Getriebeübersetzungen, Trägheitsmomente und Durchmesser der Abtriebswellen. Die Kaskadenregelung stellt durch einen kontinuierlichen Soll-/Ist-Vergleich von Drehzahl und Position eine exakte Positionierung sicher. Bei Abweichungen von der Sollbewegung - hauptsächlich bedingt durch Störeinflüsse aus dem dynamischen Schwingungsverhalten der Maststruktur des Regalbediengeräts - wird entsprechend nachgeregelt. Das Systemverhalten des Regalbediengeräts wird durch geeignete Punktmassenmodelle abgebildet. Im Bereich der Massenverteilung werden die Hauptkomponenten Bodentraverse, Maststruktur und Hubeinheit unterschieden. Zur Abbildung des Schwingungsverhaltens ist zum einen das Ein-Massen-Schwingungsmodell für Regalbediengeräte nach DIN 15350 "Regalbediengeräte; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnungen" und zum

implementiert, welches zusätzlich die aktuelle Position des Hubwagens berücksichtigt. Diese Schwingung der Maststruktur erzeugt eine Reaktionskraft im Mastfuß, welche als Störgröße auf den Bewegungsverlauf wirkt.

### 2.4 Berechnung von Leistung und Energiebedarf

Aus resultierendem Ist-Drehmoment und -Drehzahl kann die von den Antrieben zur Verfügung gestellte Leistung separat für Fahr- und Hubmotor berechnet werden. Zur Berücksichtigung von Verlusten sind die Wirkungsgrade für Getriebemotor, Seil- bzw. Zahnriementrieb und Fahrwiderstände hinterlegt. Durch Integration über die Zeit ergeben sich aus den Leistungsverläufen die Energiebedarfe der jeweiligen Antriebe.

### 2.5 Energiemanagement bei Regalbediengeräten

Aus den vorliegenden Daten für den Energiebedarf der Antriebe lassen sich nun Aussagen über Energiemanagementstrategien hinsichtlich Energieeffizienz treffen. Folgende Energiemanagementstrategien sind im Simulationsmodell implementiert (vgl. Abbildung 3):

- Antriebkonfiguration ohne Zwischenkreiskopplung (mit/ohne Superkondensatoren),
- Antriebkonfiguration mit Zwischenkreiskopplung (mit/ohne Superkondensatoren),
- Antriebkonfiguration mit Rückspeiseeinheit ins Versorgungsnetz.

Konfigurationen ohne Zwischenkreis werden heutzutage in der Branche nicht mehr eingesetzt. Zur Beurteilung der Auswirkungen des Zwischenkreises auf die Energieeffizienz wurde diese Variante ebenfalls implementiert. Stand der Technik ist vielmehr die Konfiguration mit Zwischenkreis, wobei die beiden Umrichter von Fahr- und Hubantrieb über einen Gleichstromverbund gekoppelt sind. Beim generatorischen Bremsen eines Antriebs steht die freiwerdende Energie nun dem anderen Antrieb zur Verfügung. Beispielsweise kann so beim Bremsen des Fahrwerks die freiwerdende Energie zum Heben des Hubwagens verwendet werden.

Bei der Erweiterung der Zwischenkreiskopplung um eine

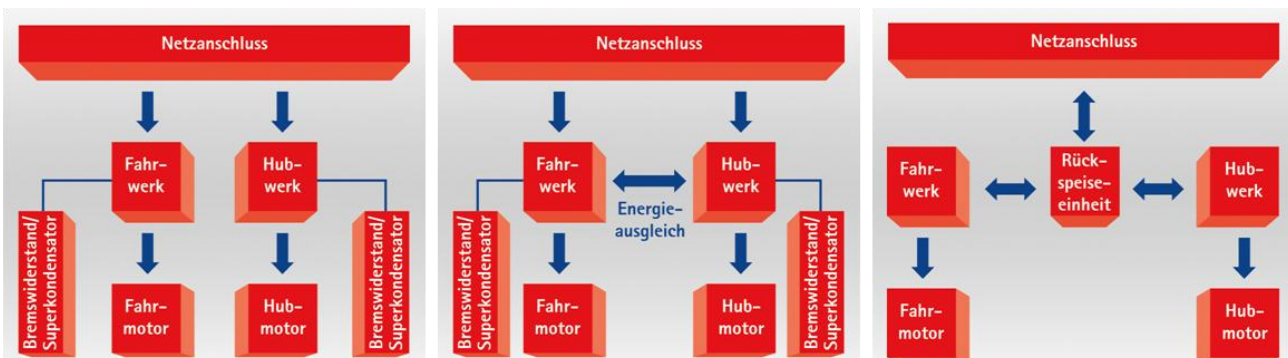


Abbildung 3: Mögliche elektrische Antriebskonfigurationen (Quelle: viastore)

anderen ein einfaches Finite-Elemente-Balkenmodell

Rückspeiseeinheit wird überschüssige Energie in das Ver-

sorgernetz rückgespeist. Die Rückspeisung läuft jedoch nicht verlustfrei ab, sodass im Simulationsmodell entsprechende Wirkungsgrade hinterlegt sind.

## 2.6 Ergebnisse und Validierung

Zur Validierung des Simulationsmodells werden umfangreiche Vergleichsmessungen an realen automatischen Kleinteilelagern (AKL) und Palettenhochregallagern durchgeführt. Beispielhaft wird die Validierung im Folgenden für ein AKL mit Geräte- und Betriebsparametern nach Tabelle 1 aufgezeigt.

Parameter	AKL
Gassenhöhe [m]	8,5
Gassenlänge [m]	23
Gesamtmasse [t]	1,8
Maximale Nutzlast [kg]	100
Fahrgeschwindigkeit [m/s]	4
Fahrbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	2
Hubgeschwindigkeit [m/s]	1
Hubbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	0,75

Tabelle 1: Geräte- und Betriebsparameter

Abbildung 4 zeigt den Vergleich des ermittelten Energiebedarfs durch Simulation und Messung für ein Doppelspiel gemäß VDI-Richtlinie 3561 "Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen".

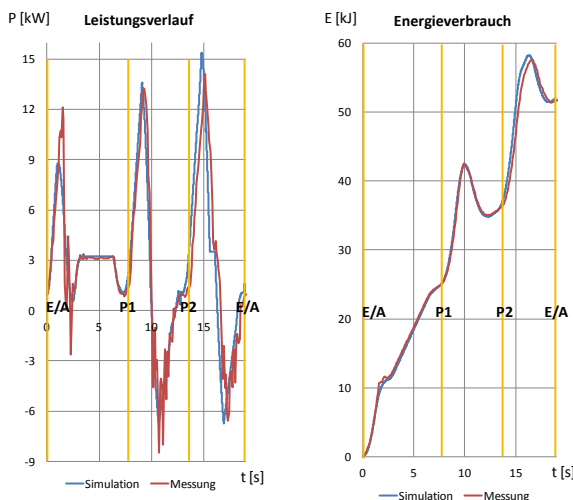


Abbildung 4: Messung und Simulation eines VDI-Doppelspiels (links: Leistungsaufnahme, rechts: Energiebedarf) (Quelle: fml)

Tabelle 2 stellt die Ergebnisse zwischen berechnetem und gemessenem Energieverbrauch gegenüber. Die Messungen werden dabei an der Versuchsanlage des automatischen Kleinteilelagers des Lehrstuhls fml durchgeführt. Dieses Regalbediengerät verfügt, wie auch an den Ergebnissen zu erkennen ist, über eine Rückspeiseeinheit. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation mit einer Abweichung von lediglich 0,78%.

	Simulation [kJ]	Messung [kJ]	Abweichung [%]
E/A → P1	24,43	24,50	0,30
P1 → P2	10,76	10,89	1,12
P2 → E/A	16,82	16,23	3,68
Gesamt	52,02	51,62	0,78

Tabelle 2: Energiemessung und Simulation für das VDI-Doppelspiel

Mit Hilfe dieses validierten Simulationsmodells werden umfangreiche Studien zur Bewertung des Energieverbrauchs verschiedener Antriebskonfigurationen entsprechend Abschnitt 2.5 durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die ermittelten Energiebedarfe für jeweils 500 Doppelspiele für das automatische Kleinteilelager bei chaotischer Lagerung sowie unterschiedlichen elektrischen Antriebskonfigurationen.

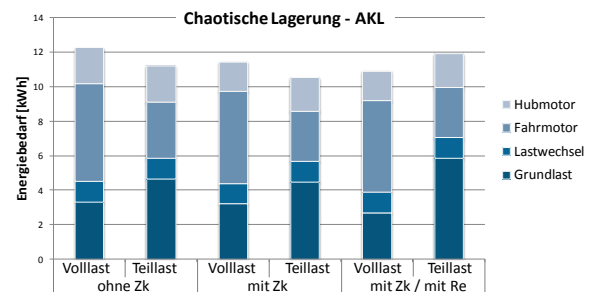


Abbildung 5: Energiebedarf in Abhängigkeit der elektrischen Antriebskonfiguration (Quelle: fml)

Durch eine Zwischenkreiskopplung von Fahr- und Hubwerk lässt sich bei vorliegender Anlage ein Energieeinsparpotenzial von 12% sowie bei zusätzlicher Verwendung von einer Rückspeiseeinheit ein Energieeinsparpotenzial von 25% realisieren. Des Weiteren lässt sich mit Hilfe von Superkondensatoren bei der Antriebskonfiguration "ohne Zwischenkreiskopplung (Zk)" 30% und "mit Zwischenkreiskopplung" 25% Energie einsparen. Werden Voll- und Teillast (halbe Geschwindigkeiten) miteinander verglichen, lässt sich feststellen, dass durch die geringeren Dynamikwerte des Teillastbetriebs die Spitzenleistungen der Antriebseinheiten deutlich niedriger sind. Gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Fahrzeiten und damit der Anteil der Grundlast am Gesamtenergiebedarf um 40-50%. Bei den Antriebskonfigurationen „ohne Zwischenkreiskopplung“ und „mit Zwischenkreiskopplung“ kann zwar der Gesamtenergiebedarf im AKL um 8-9% gesenkt werden, bei Verwendung einer Rückspeiseeinheit (Re) führen die erhöhten Grundlastbedarfe unter Berücksichtigung der ins Netz gespeisten überschüssigen Energie jedoch zu einem Energiemehrbedarf von 10%. Aus rein energetischer Sicht ist damit bei Verwendung einer Rückspeiseeinheit eine Reduzierung der Dynamikwerte kontraproduktiv.

### 3 Energieeffizienz durch Leichtbaudesign

#### 3.1 Ganzheitliche Vorgehensweise

Entsprechend den dargestellten Untersuchungen liegen erhebliche Energieeinsparpotenziale in einer leichtbautechnischen Weiterentwicklung von Regalbediengeräten. Eine ganzheitliche Umsetzung dieses Ziels verlangt den Einsatz verschiedener rechnergestützter Methoden, welche die Grundlage für das neue Leichtbaudesign schaffen sollen. Zur leichtbautechnischen Optimierung mechanischer Strukturen werden insbesondere die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) sowie eindimensionale Simulationen (z. B. Matlab/Simulink) im Leichtbau eingesetzt [2]. Eine der Herausforderungen ist dabei die Verknüpfung der verschiedenen Berechnungs- und Simulationsansätze für einen ganzheitlichen Systemleichtbau. Das Zusammenwirken der im aktuellen Entwicklungsprozess eingesetzten Simulationenwerkzeuge ist in Abbildung 6 dargestellt.

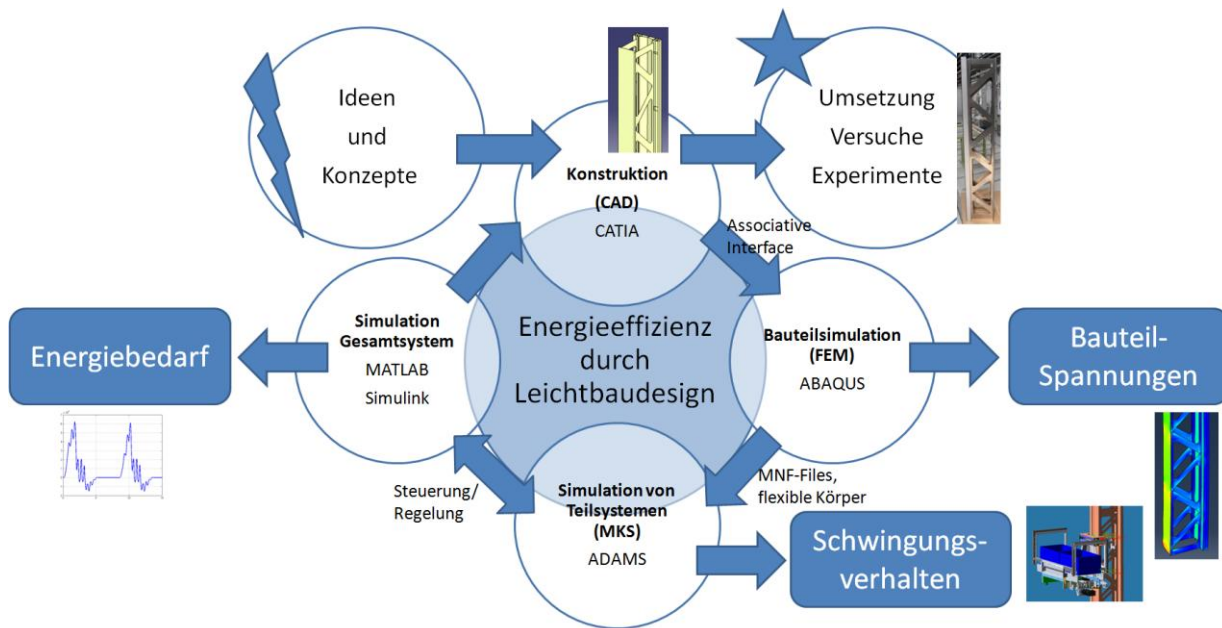


Abbildung 6: Ganzheitlicher Entwicklungsprozess durch Verknüpfung der Simulationenwerkzeuge (Quelle: fml)

In diesem Verbund wird das oben beschriebene, neu entwickelte MATLAB/Simulink-Simulationenwerkzeug direkt in den ganzheitlichen Entwicklungsprozess integriert. Konstruktive Ideen werden mittels der CAD-Software CATIA gestaltet. Über eine parametrisierte Schnittstelle ist es sodann möglich, die CAD-Daten in die FEM-Umgebung ABAQUS zu importieren. Hier werden die Einzelbauteile dimensioniert und rechnerisch überprüft. Darüber hinaus können Bauteile als sog. flexible Körper in das MKS-Programm ADAMS eingelesen werden um dynamische Prozesse zu simulieren. Über die Schnittstelle zur Co-Simulation zwischen MATLAB/Simulink und ADAMS können nun die aus den generierten Bahnkurven

resultierenden Beschleunigungskräfte ermittelt und so die Mastschwingung in Co-Simulation berechnet werden.

#### 3.2 Leichtbaukonzepte und Bauweisen

Stand der Technik für die Hauptkomponente RBG-Mast sind derzeit Tragwerkskonstruktionen mit dünnwandigen Stahlblechen, wobei trotz der Dünnwandigkeit durch geeignete Querschnittsgestaltung eine hohe Steifigkeit der Maststruktur erreicht werden kann. Seit kurzem ist auch ein Regalbediengerät mit einem Leichtbaumast in Mischbauweise am Markt verfügbar, welches auf Multi-materialdesign unter Verwendung von Stahl, Aluminium und Verbundwerkstoff setzt [3]. Der Einsatz von Stahl ist jedoch im Allgemeinen wegen dessen hoher Steifigkeit und Festigkeit bei sehr niedrigen Werkstoffkosten derzeit nahezu überall in der Branche üblich. Doch durch die sehr hohe Werkstoffdichte von Stahl sind solchen Lösungen hinsichtlich einer Leichtbaukonstruktion Grenzen gesetzt.

Folglich ist es notwendig, neue Werkstoffe mit hoher Steifigkeit und geringer Dichte einzusetzen, um das Gewicht weiter zu reduzieren. Wie auch in anderen Branchen rücken hierbei Faserverbundwerkstoffe und insbesondere kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in den Fokus. Neben hoher Steifigkeit und niedriger Dichte sind bei CFK die hervorragenden Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Materialermüdung von Vorteil. Allerdings sind völlig andere Bauweisen, Füge- und Fertigungsverfahren anzuwenden. Zudem ist zu beachten, dass die Anisotropie des Werkstoffs berücksichtigt und zweckmäßig genutzt werden muss, was Konstruktion und Auslegung aufwändiger gestaltet. Neu zu konzipieren sind sämtliche Funktionsflächen und Anschlüsse. Beispielhaft



sei hier die Gestaltung der Lauf- und Führungsflächen am CFK-Mast genannt, die der hohen lokalen Belastung durch die Rollen des Hubwagens ausgesetzt werden. Als besonders nachteilig erweisen sich allerdings die beträchtlichen Werkstoffkosten des Leichtbauwerkstoffs CFK. Daraus resultierende erhöhte Anschaffungskosten sind dem Kunden nur bedingt vermittelbar. Sie müssen durch eine kurze Amortisationszeit zumindest ausgeglichen werden, was durch geringere Energieverbrauchskosten erreicht wird. Hierzu bietet sich das Simulationsmodell zur Berechnung und Bewertung des Energieverbrauchs an, um Kosteneinsparpotenziale detailliert aufzuzeigen. Um die Kostenerhöhung in einem vertretbaren Rahmen zu halten, sind zwei alternative Strategien denkbar. Zum einen ist Multimaterialdesign mit gezielt minimalem Einsatz von CFK ein geeigneter Ansatz. Hierbei wird CFK nur dort eingesetzt, wo es den größten Nutzwert bringt. Für den Mast würde sich dabei ein Werkstoffverbund ähnlich eines Sandwiches anbieten. Dabei besteht die Tragwerkskonstruktion noch weitestgehend aus Metall und wird durch CFK-Stringer versteift. Bei dieser Strategie gilt es, die Fügeverbindung und insbesondere die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu beachten. Zum anderen wird als weitere Strategie verfolgt, für eine Maststruktur in Voll-CFK-Bauweise Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Grundlage hierfür ist eine möglichst einfache Gestaltung der Maststruktur. Darauf aufbauend müssen CFK-Fertigungsverfahren gewählt werden, die bei geringer Stückzahl wirtschaftlich sind und zugleich Prozessstabilität und gesicherte Qualität bieten. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht hier derzeit das Vakuuminfusionsverfahren. Maßgeblich ist, dass der Einsatz von CFK daraufhin abgestimmt wird, wie sich die Mehrkosten infolge des modernen Leichtbaus durch Energiekosteneinsparungen im Betrieb über einen akzeptablen Zeitraum amortisieren. Wichtige Einflussgrößen sind hierbei die weitere Entwicklung der zukünftigen Werkstoff- und Fertigungskosten sowie des Strompreises. Zukünftig steigende Strompreise und fallende Herstellkosten verkürzen die Amortisationszeit erheblich.

### 3.3 FE-Berechnungen und Auslegung

Zur Auslegung von Leichtbaukonzepten ist bei Verwendung von Faserverbundwerkstoffen aufgrund der Anisotropie der Einsatz der Finite-Elemente-Methode unumgänglich. Hierzu werden aus den in der CAD-Software CATIA konstruierten Konzepten Schalen- oder Volumenmodelle abgeleitet und mit der FE-Software ABAQUS ausgelegt. Für die Lastannahmen wird als Grundlage die Norm DIN 15350 "Berechnungsgrundsätze für Stahltragwerke - Regalbediengeräte" herangezogen. Aus dieser Norm können selbstverständlich nur die Ansätze für die Lastannahmen entnommen werden, da sich die Norm auf Stahl-

tragwerke beschränkt. Es werden Lastfälle mit Eigenlast-, Hub- und Schwingbeiwerten für die Auslegung definiert. Für die Festigkeitsnachweise ist wegen der Anwendung der Leichtbauwerkstoffe auf andere geeignete Normen und Richtlinien zurückzugreifen. In Abbildung 7 (links) ist exemplarisch das Spannungsergebnis für einen Ausschnitt der Maststruktur beim Lastfall "Pufferstoß" dargestellt.

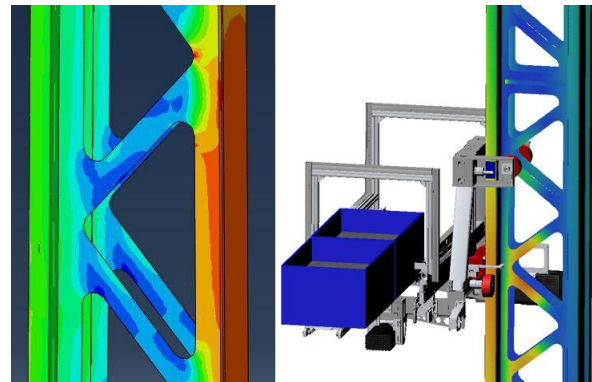


Abbildung 7: CAE-Einsatz im Entwicklungsprozess (links: FE-Plot "Pufferstoß", rechts: MKS "Ein-/Auslagern") (Quelle: fml)

Zu untersuchen ist die statische Festigkeit und die Sicherheit gegen Beul- oder Knickversagen beim Pufferstoß. Zudem spielt der Nachweis gegen Ermüdung für den Betrieb ("Verfahren" und "Ein-/Auslagern") eine bedeutende Rolle. Für Stahl- und Aluminiumstrukturen wird die FKM-Richtlinie "Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile" zum Nachweis herangezogen, um statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit unter Verwendung der FEM nachzuweisen. Für CFK-Strukturen ist allgemein bekannt, dass sie über hervorragende Ermüdungseigenschaften verfügen. Rechnerische Ermüdungsfestigkeitsnachweise im Sinne einer Norm sind jedoch noch nicht verfügbar, sodass man sich hier auf Erfahrungswerte verlassen muss. Für den statischen Festigkeitsnachweis der CFK-Strukturen werden Kriterien wie Tsai-Wu oder Hashin angewendet.

### 3.4 MKS-Simulation

Neben den kinematischen Parametern Beschleunigung und Fahrgeschwindigkeit wird die Leistungsfähigkeit des Regalbediengeräts auch von den erforderlichen Beruhigungszeiten beeinflusst. Um bereits im Zuge der Entwicklung Aussagen über das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems Regalbediengerät tätigen zu können, kommt die hybride Mehrkörpersimulation zum Einsatz, bei der elastische Strukturen wie der Mast als sog. flexible Körper mit den restlichen Starrkörpern des Mehrkörpersystems interagieren. Durch die Abbildung der Bewegung des Lastaufnahmemittels beim Lastfall "Ein-/Auslagern" können auftretende Schwingungen identifiziert sowie Maßnahmen zur Schwingungsreduktion im Zuge der Entwicklung getestet werden (Abbildung 7 rechts).

### 3.5 Grundlagenuntersuchung zur Verklebung

Neben den theoretischen Untersuchungen werden verschiedene praktische Versuche am Lehrstuhl fml in Angriff genommen. Für Verbundkonzepte werden das Fügen von CFK-Stringern auf handelsüblichen Aluminiumprofilträgern durch Verklebung untersucht und Belastungsexperimente durchgeführt. Diese Sandwichbalken werden einseitig eingespannt und stufenweise bis zum Versagen belastet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 zu sehen.



Abbildung 8: Grundlagenversuch zur Verklebung (Quelle: fml)

Ziel ist einerseits die Überprüfung der Praxistauglichkeit verschiedener Klebstoffe (Topfzeiten, Viskosität, usw.). Es kommen sowohl Strukturkleber als auch elastische Kleber zum Einsatz.

Andererseits gilt es, die Annahme zu überprüfen, ob in den Verbundfugen einen idealer Verbund angenommen werden kann. In diesem Fall ist in der Berechnung davon ausgehen, dass die Materialien fest miteinander verbunden sind.

Beim Belastungsversuch ist zu beobachten, dass unmittelbar vor dem Versagen eine plastische Verformung des Aluminiums in der Nähe der Einspannstelle auftritt und bei weiterer Erhöhung der Belastung erste Fasern der CFK-Deckschichten reißen. Die Verklebung zwischen CFK und Aluminium hält den Belastungen stand und stellt bedingt durch die großen Klebeflächen keine Schwachstelle dar.

### 3.6 Prototyp-Maststück und Rollversuche

Nach den erfolgreichen Grundlagenversuchen zu Verbundleichtbaukonzept wird dementsprechend ein geeigneter Mastquerschnitt entworfen und ein zwei Meter langes Prototypmaststück gefertigt. An diesem wird derzeit ein Dauerversuch durchgeführt, um Verschleißerscheinungen aus dem Abrollverhalten der Hubwagenrollen direkt auf dem Kohlefaserwerkstoff zu untersuchen. Dabei wird mit Hilfe eines Versuchshubwagens dauerhaft ein Rollendruck entsprechend des kritischsten Lastfalls auf das Maststück aufgebracht. Zusätzlich wird

der Versuchshubwagen mit Hilfe eines Kurbeltriebs dynamisch mit Beschleunigung entsprechend eines realistischen Hubvorgangs auf einer Rollfläche von 80 mm verfahren. Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau. Das Maststück ist horizontal eingespannt, um die Gravitation zum Aufbringen der Belastung auszunutzen.



Abbildung 9: Dauerversuch zur Hubwagen-Rollenbelastung auf CFK (Quelle: fml)

Der Versuchsaufbau erlaubt die Nachbildung der über die Lebensdauer stattfindenden Überrollvorgänge der Hubwagenrollen auf dem CFK-Werkstoff. Nach der Hälfte der Versuchszeit sind bisher keinerlei Schäden am CFK festzustellen.

### 3.7 Geplanter Demonstrator

Im weiteren Forschungsverlauf ist der Aufbau eines Demonstrator-RBG in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik in Kooperation mit der viastore systems GmbH geplant. Zudem ist für die CFK-Fertigung eine Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites (lcc) der Technischen Universität München beabsichtigt. Anhand dieses Demonstrators soll die praktische Tauglichkeit des Einsatzes moderner Faserverbundwerkstoffe im Bereich der Regalbediengeräte für automatische Kleinteilelager untersucht und nachgewiesen werden. Hierdurch soll ein entscheidender Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz und Leistungsfähigkeit solcher Anlagen geleistet werden. Der Demonstrator wird voraussichtlich bis Ende des Jahres 2012 in Betrieb genommen.

## 4 Literatur

- [1] Furmans, K.: Leichtbau bei Unstetigförderern durch Einsatz moderner Werkstoffe. WGT-Tagungsband 2011
- [2] F. Henning, Handbuch Leichtbau, Hanser Verlag
- [3], Gebhardt Fördertechnik: Schnelligkeit siegt. Materialfluss 1-2/2012, S. 26-27