

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18366 BR

## Thema

Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Funktionswerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten

## Berichtszeitraum

01.10.2014 - 30.11.2016

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (FG IFL) e. V.

## Forschungsstelle(n)

Technische Universität Dresden - Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme (TLA),  
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)

---

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt (TLA)

---

Name und Unterschrift des Projektleiters der Forschungsstelle 1

---

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Niels Modler (ILK)

---

Name und Unterschrift des Projektleiters der Forschungsstelle 2

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Kurzfassung

Das Forschungsziel bestand darin, den Einsatz faser- bzw. textilverstärkte Kunststoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten in Regalbediengeräten (RBG) als Alternative zu konventionellen isotropen metallischen Werkstoffen zu untersuchen. Zur Erreichung des Ziels wurde eine abstrahierte Mastkonstruktion aus dem gewählten Referenz Paletten-RBG abgeleitet. Unter Berücksichtigung der konstruktiven und simulativen Ergebnisse wurden skalierte Demonstratormasten sowohl aus dem Referenzmaterial Stahl als auch aus der favorisierten Faserverbundkonstruktion hergestellt. Es erfolgte die Validierung der FE-Modelle anhand der in experimentellen Analysen ermittelten Modalparameter. Unter Berücksichtigung der definierten Lastannahmen, die auch für die FE-Analyse herangezogen wurden, wurden die Demonstratormasten am dafür konstruierten Prüfstand in statischen Versuchen und in Ausschwingversuchen miteinander verglichen. Bei der statischen Querbelaugung (quer zur Gasse) am Mastkopf betrug die seitliche Auslenkung am CFK-Mast nur 60 %, bezogen auf den Referenzmast aus Stahl. In Ausschwingversuchen (quer zur Gasse) konnte beim CFK-Mast eine 4fach höhere Dämpfung gemessen werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich faser- bzw. textilverstärkte Kunststoffe hervorragend für die gezielte Dämpfung der Strukturschwingungen am Demonstratormast eignen. Zusätzlich konnte beim CFK-Mast eine Masseinsparung von 43 % gegenüber dem Stahlmast erreicht werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens können zur Auslegung von RBG-Hubmasten aus faser- bzw. textilverstärkten Kunststoffen genutzt werden. Deren Einsatz soll in der Praxis am realen RBG erprobt und weiterentwickelt werden.

---

# Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG .....	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	IV
TABELLENVERZEICHNIS .....	VI
<b>1 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE IM BERICHTSZEITRAUM.....</b>	<b>1</b>
1.1 SYSTEMATISIERUNG VON REGALBEDIENGERÄTEN UND AUSWAHL EINES REFERENZSYSTEMS .....	1
1.2 ANALYSE DES REFERENZSYSTEMS .....	11
1.3 KONZEPTION UND KONSTRUKTION ALTERNATIVER LEICHTBAUWEISEN .....	23
1.4 KENNWERTERMITTLUNG .....	29
1.5 SIMULATION .....	29
1.6 DEMONSTRORMASTEN .....	34
1.7 UNTERSUCHUNGEN AN DEMONSTRORMASTEN.....	37
1.8 AUFBEREITUNG DER FORSCHUNGSERGEBNISSE .....	42
<b>2 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG .....</b>	<b>46</b>
<b>3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT .....</b>	<b>47</b>
<b>4 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT .....</b>	<b>47</b>
<b>QUELLEN .....</b>	<b>49</b>
<b>ANLAGENVERZEICHNIS.....</b>	<b>51</b>
<b>Anlagen</b>	

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundaufbau des RBG [DIN 15350/92] .....	1
Abbildung 2: Regalbediengerät mit Zahnriemenfahr- und Hubantrieb [URL1].....	3
Abbildung 3: Beispiele für Bewegungsabläufe des RBG [Arn/09].....	4
Abbildung 4: Überlagerung der Bewegungsabläufe eines RBG beim Einzelspiel „Einlagern“ [Arn/09] .....	5
Abbildung 5: Gegenüberstellung der Ausschwingvorgänge von Stahl und CF/EP .....	9
Abbildung 6: Geschwindigkeitsverlauf auf max. Geschwindigkeit normiert, 1. Fall: Gassenfahrt (Fahrwerk) .....	11
Abbildung 7: Geschwindigkeitsverlauf auf max. Geschwindigkeit normiert, 2. Fall: Auslagerungsvorgang (Teleskop) .....	12
Abbildung 8: Fahrleistung- und Fahrwegverlauf bei Gassenfahrt; Messung Viastore RBG.....	13
Abbildung 9: Hubleistung- und Hubwegverlauf; Messung Viastore RBG .....	13
Abbildung 10: Strukturschwingungen am Einmast RBG; Schwingung in Gassenrichtung (links); Schwingung quer zur Gasse (rechts).....	15
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Schwingungsverhaltens beim Anfahren und Abbremsen eines RBG .....	15
Abbildung 12: Randbedingungen am FE-Modell .....	17
Abbildung 13: Vergleich der Eigenfrequenzen, normiert auf 1. Eigenfrequenz des Referenzmasts; Referenzmast (V3, V4), abstrahierter Mast (V7, V8) .....	18
Abbildung 14: Vergleich der Eigenformen des Referenzmasts und abstrahierten Masts; 2. Lastfall.....	18
Abbildung 15: Ablauf eines kombinierten Spiels; 1. Fall nach [FEM 9.851/03].....	20
Abbildung 16: Chronologischer Ablauf des kombinierten Spiels und Teilzeiten für einzelne Vorgänge .....	21
Abbildung 17: Belastungskollektiv für den 1. Lastfall.....	22
Abbildung 18: Belastungskollektiv für 2. Lastfall.....	23
Abbildung 19: Realisierung der gleichen Durchbiegung bei Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe .....	24
Abbildung 20: Durchbiegung zweier Hohlprofile gleicher Masse, Kraft am freien Ende .....	25

---

Abbildung 21: Mögliche Maßnahmen zur Schwingungsreduktion an Regalbediengeräten .....	25
Abbildung 22: Mast-Bauweisen und -Anschlüsse .....	28
Abbildung 23: Ermittlung der Abklingzeit $ta$ .....	30
Abbildung 24: FE Modell des untersuchten Masts (links) mit den untersuchten Extremlastfällen (mitte, rechts) .....	32
Abbildung 25: Darstellung von drei Beispielen des ersten Extremlastfalles und die dazugehörigen Abklingprozesse .....	33
Abbildung 26: Demonstratormast in Stahlbauweise .....	35
Abbildung 27: Vorzugsvariante aus CFK mit in die Hauptstruktur integrierten Führungsschienen .....	36
Abbildung 28: Ablauf der Fertigung des CFK-Demonstratormasts .....	37
Abbildung 29: Versuchsaufbau experimentelle Modalanalyse .....	38
Abbildung 30: Mobile Messplattform für die Schwingungsmessung der Masten .....	40
Abbildung 31: Abklingverhalten von Stahl- und CFK/TPU-Masts .....	41

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standardkennwerte des Behälter- und Paletten-RBG [Hom/07] .....	2
Tabelle 2: Vergleich von Kostenanteilen und Wirksamkeit für Stahl- und CFK-Masten.....	10
Tabelle 3: Technische Daten des Referenzsystems.....	10
Tabelle 4: Werkstoffkennwerte .....	16
Tabelle 5: Lagerkonfiguration des FE-Modells .....	17
Tabelle 6: Lasten und Beiwerte für den 1. Lastfall.....	19
Tabelle 7: Lasten und Beiwerte für 2. Lastfall.....	19
Tabelle 8: Koordinaten angenommener Lagerpunkte.....	20
Tabelle 9: Belastungskollektiv für den 1. Lastfall .....	22
Tabelle 10: Belastungskollektiv für 2. Lastfall .....	22
Tabelle 11: Werkstoffeigenschaften TPU-Folie BASF Elastollan 1185 A [URL2] .....	26
Tabelle 12: Anbindungskonzepte von CFK-Mast und Traverse.....	27
Tabelle 13: Material, Dicke und Lagenaufbau der untersuchten Varianten .....	31
Tabelle 14: Simulationsergebnisse der bestgeeigneten Varianten für die weitere Auswahl einer Vorzugsvariante, normiert auf die Referenzvariante A (*Die maximale Amplitude dieser Varianten lagen bereits unter der Grenze von 20 %)	33
Tabelle 15: Lagenaufbauten der Demonstratormasten .....	35
Tabelle 16: Untersuchte Demonstratormasten und Einspannungen .....	39
Tabelle 17: EMA Ergebnisse Demonstratormast Stahl 01.....	41
Tabelle 18: EMA Ergebnisse Demonstratormast CFK/TPU und CFK .....	41
Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse zwischen Stahl-, CFK- und CFK/TPU-Demonstratormast.....	42
Tabelle 20: Angaben zum Personaleinsatz (TLA) .....	46
Tabelle 21: Angaben zum Personaleinsatz (ILK).....	46



In Abbildung 1 ist ein RBG mit seinen wesentlichen Baugruppen dargestellt. Hauptbestandteil ist ein senkrecht stehender Mast, der oben und unten durch Führungselemente auf bzw. an Schienen geführt und von einem Fahrtrieb horizontal in der Gasse bewegt wird (Arbeitsbewegung Fahren). An ihm bewegt ein Hubtrieb einen Hubwagen mit Lastaufnahmemittel (LAM) und Last in vertikaler Richtung (Arbeitsbewegung Heben). Das LAM besitzt einen Antrieb, der die Last horizontal, senkrecht zur Gasse bewegt (Arbeitsbewegung Ausschieben der Last). Typische technische Daten von RBG für den Umschlag von Behältern und Paletten zeigt Tabelle 1.

Je nach Anwendungsfall werden Ein- oder Zweimast-RBG eingesetzt. Einmast-RBG finden ihren Einsatz in automatischen Kleinteilelagern (AKL) mit Bauhöhen bis zu 18 m sowie in Hochregallagern (HRL) mit Bauhöhen bis zu 45 m. Bei niedrigen Bauhöhen und leichtem Umschlaggut sind wegen der geringen Gesamtmasse sehr hohe Fahrgeschwindigkeiten möglich. Ein weiterer Vorteil von Einmast-RBG ist die kompakte Bauweise. Diese hat einen unmittelbaren Einfluss auf das seitliche Anfahrmaß der Regalanlage und somit auf das nutzbare Lagervolumen [Hom/07].

Zweimast-RBG werden aus folgenden Gründen verwendet:

- große Nutzlast
- hohe Schwingungsstabilität, aufgrund der steifen Konstruktion
- lange Güter
- Möglichkeit zu Steigerung der Umschlagleistung durch zwei unabhängige Hubwagen

**Tabelle 1: Standardkennwerte des Behälter- und Paletten-RBG [Hom/07]**

Leistungsmerkmal	Kennwerte von RBG	
	Behälter	Palette
Traglast [kg]	50 - 300	300 - 5000
Fahrgeschwindigkeit [m/min]	bis 360	bis 240
Hub-/Senkgeschwindigkeit [m/min]	bis 120	bis 80
Fahrbeschleunigung [ $m/s^2$ ]	bis 3	bis 1
Hubbeschleunigung [ $m/s^2$ ]	bis 2	bis 2

Für die horizontale Bewegung der Last in der Gasse ist bei einem konventionellen RBG ein kraftschlüssiger Fahrtrieb an der Bodentraverse installiert; alternativ ein (formschlüssiger) Zahnriemenantrieb (siehe Abbildung 2). Der Formschluss hat folgende Vorteile [Per/09]:

- hohe Leistungsdichte, damit kompakte Bauweise
- synchrone und schlupffreie Bewegungsübertragung
- hohe Fahrgeschwindigkeit
- hohe Beschleunigung und Verzögerung
- sehr hohe Positioniergenauigkeit

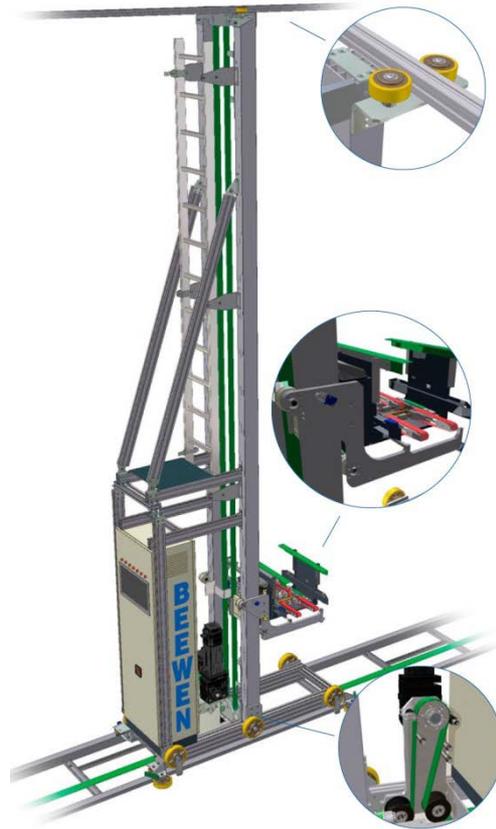


Abbildung 2: Regalbediengerät mit Zahnriemenfahr- und Hubantrieb [URL1]

Die hohen Beschleunigungen und Verzögerungen, die mit dem Zahnriemenantrieb realisierbar sind, verkürzen die Taktzeit eines RBG erheblich; die damit verbundenen hohen Massenkräfte regen aber mechanische Schwingungen im RBG an, die kompensiert werden müssen. Für das Ein- bzw. Auslagern des Lagerguts muss die Schwingung des Lastaufnahmemittels nahezu vollständig abgeklungen sein, um eine sichere Gutübergabe zu gewährleisten. Dieser Vorgang beeinflusst die Taktzeit des RBG und damit die Umschlagleistung negativ. Schwingungsamplitude und -dauer hängen u. a. von folgenden Größen und Parametern des RBG ab:

- Bauhöhe
- Steifigkeit des Masts
- Dämpfung des Masts
- Eigenmasse des Masts
- Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung

Diese Parameter spielen eine entscheidende Rolle bei der Wahl des Referenzsystems.

Im Rahmen einer Analyse zum Einsatz von RBG im Umschlagbetrieb wurde eine Übersicht mit typischen Arbeitsspielen und einzelnen Betriebsphasen erarbeitet. Die am häufigsten eingesetzten RBG sind Einmast-Geräte mit geschweißtem Kastenträ-

ger [Per/09]. Ihre Fahr- und Hubantriebe sind mit moderner Servo- sowie Steuerungstechnik ausgestattet, um optimale Fahrwege und Taktzeiten zu erzielen. Die zwischen dem Aufnehmen der einen und der nächsten Last ausgeführten Einzelbewegungen bilden das Spiel; die dazwischen liegende Zeit ist die Spielzeit. Beim Umschlag in einem Lagersystem kommen drei verschiedene Spielarten zur Anwendung:

- reines Einlagerungsspiel
  - RBG führt ausschließlich Einlagerung von Ladeeinheiten (LE) aus
  - Rückfahrt des RBG zur Ausgangsposition ist immer eine Leerfahrt
- reines Auslagerungsspiel
  - RBG führt ausschließlich Auslagerung von LE aus
  - Hinfahrt des RBG zum ersten Lagerplatz ist immer eine Leerfahrt
- kombiniertes Ein- und Auslagerungsspiel
  - während eines Spiels führt das RBG sowohl Ein- als auch Auslagerung von LE

Abbildung 3 stellt die Bewegungsabläufe des RBG bei unterschiedlichen Spielarten dar.

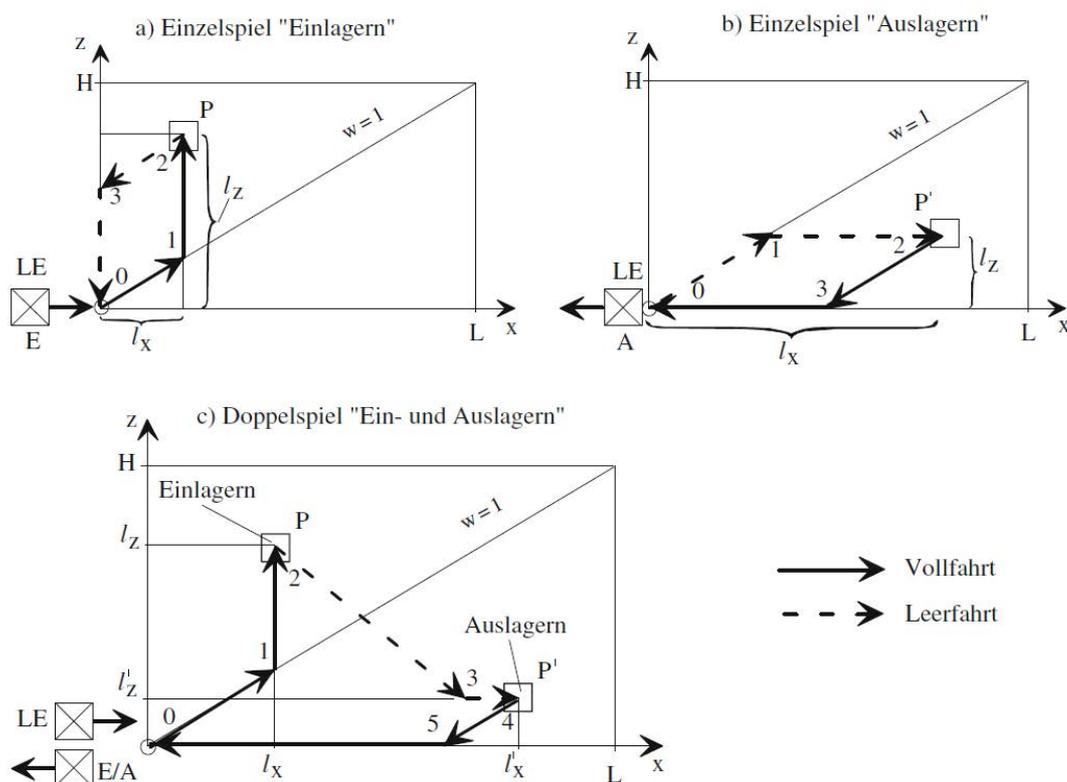
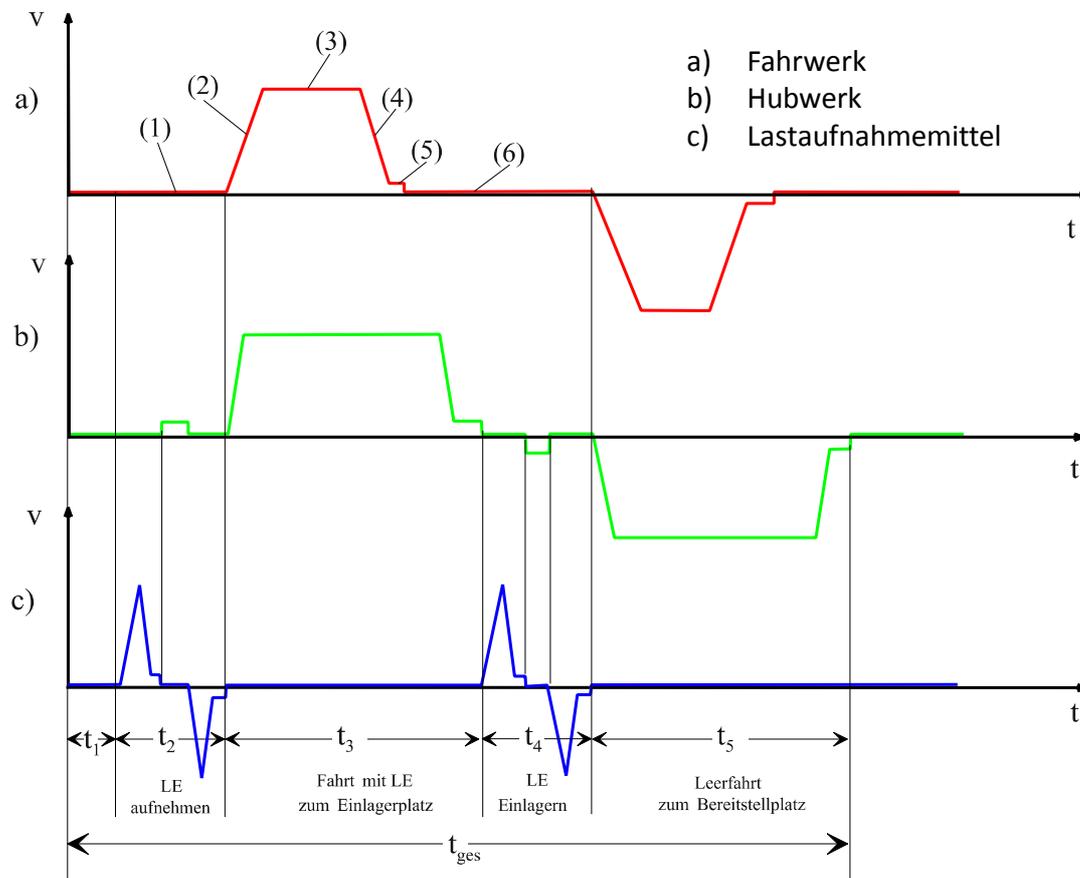


Abbildung 3: Beispiele für Bewegungsabläufe des RBG [Arn/09]

Um die Spielzeit zu minimieren, werden in der Praxis i. Allgem. die Bewegungsabläufe (vertikales) Heben des Hubwagens mit Lastaufnahmemittel (LAM) und (horizontale) Fahrt in der Gasse überlagert. Prinzipielle Geschwindigkeitsverläufe  $v$  für Fahrwerk, Hubwerk und LAM-Ausschub sind in Abbildung 4 dargestellt. Beim Fahr-

werk wiederholen sich sechs Phasen: (1) Pause, (2) Anfahren, (3) Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, (4) Bremsen, (5) Positionieren mit „Schleichfahrt“ am Ziel, (6) Pause.



**Abbildung 4: Überlagerung der Bewegungsabläufe eines RBG beim Einzelspiel „Einlagern“ [Arn/09]**

In der Praxis werden die Rampen für die Anfahr- bzw. Bremsvorgänge geglättet. Hierfür werden durch Servoumrichter sinusförmige Rampen generiert, um das System möglichst ruckfrei zu beschleunigen bzw. verzögern.

Die Positionierung kann mit zwei verschiedenen Verfahren realisiert werden. Bei der

- Absolutpositionierung orientiert sich die Steuerung an Positioniermarken, welche an jeder Lagerzelle angebracht sind;
- Relativpositionierung orientiert sich die Steuerung an Positioniermarken, welche am Mast des RBG und entlang des Verfahrwegs angebracht sind.

Beide Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile. Mit der Absolutpositionierung wird eine hohe Genauigkeit und Toleranzunabhängigkeit erreicht, sie ist jedoch langsamer und aufwändiger in der Installation und Bedienung. Mit der Relativpositionierung wird die Zielposition dagegen schneller erreicht, sie ist einfacher in der Bedienung, erfordert aber die Berücksichtigung der Regaltoleranzen und eine Gerätejustierung bei der Installation [Gud/10]. Aus diesem Grund werden die beiden Verfahren oft auch kombiniert, z. B. das Relativverfahren für die grobe Positionierung und anschließende Feinpositionierung mit dem Absolutverfahren.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchte Schwingungsproblematik betrifft die Anfahr- und Bremsvorgänge beim Fahren sowie beim Ausschieben der Last. Natürlich wird, wie in der Abbildung 2 zu erkennen ist, dem Ausschieben der Last keine weitere Arbeitsbewegung überlagert. Das Schwingungsverhalten für die zwei Lastfälle Fahren und Ausschieben der Last getrennt voneinander untersucht.

### **Sicherheitstechnische Anforderungen**

Die Zusammenfassung der einsatzrelevanten sicherheitstechnischen Anforderungen an das RBG erfolgte im Rahmen einer eingehenden Analyse von relevanten Vorschriften und Normen.

#### *Hubwerk*

Alle Hubwerke müssen mit Bremsen ausgestattet sein, die in der Lage sind, die Prüflast – Nennlast plus Zusatzlast für Prüfzwecke – aus beliebiger Anwendungsbewegung bei Nenngeschwindigkeit sicher zum Stillstand bringen und einen sicheren Halt der Hubeinheit garantieren [DIN EN 528/09]. Beim Einsatz von Haltebremsen müssen diese die genannten Anforderungen erfüllen. Um unzulässige Stöße zu vermeiden und den Hubweg definiert zu begrenzen, müssen Endanschläge im unteren und oberen Bereich des Geräts vorhanden sein. Eine Fangvorrichtung ist nicht erforderlich, sofern keine Gefährdungen für Personen bestehen.

#### *Beschleunigung und Verzögerung*

Unter normalen Betriebsbedingungen (einschließlich eines Not-Halts der Kategorie 1 nach [DIN EN 60204-32/09], Abschnitt 9.2.2) muss die maximal zulässige Beschleunigung und Verzögerung weniger als  $1,5 \text{ m/s}^2$  in horizontaler Richtung und weniger als  $2,5 \text{ m/s}^2$  in vertikaler Richtung betragen.

Es sind Einrichtungen vorzusehen, die verhindern, dass die Bedienungsperson aufgrund der Beschleunigung oder Verzögerung das Gleichgewicht verliert, z. B. Haltegriffe oder Sitze [DIN EN 528/09].

#### *Standsicherheit*

Das Regalbediengerät muss so konstruiert und gebaut werden, dass das Umkippen der Anlage bei betriebsmäßiger Anwendung und auch beim Auslösen von Sicherheitsvorrichtungen nicht auftritt.

Die Standsicherheit  $v_s$  errechnet sich aus:

$$v_s = \frac{\sum \text{Standmomente}}{\sum \text{Kippmomente}} \quad (1.1)$$

Massenkräfte und Nutzlasten, die eine stabilisierende Wirkung auf das Kippsystem haben, dürfen nur dann berücksichtigt werden, wenn diese zwangsläufig vorhanden sind. Bei Kippsicherungen, die den Schienenkopf umgreifen, müssen die Schienen,

deren Befestigung, Führungen und sonstige Teile die auftretenden Kräfte aufnehmen können. Um die Schwingungsvorgänge im System zu berücksichtigen, müssen die aus der Nutzlast und allen Komponenten des Gerätes resultierenden Massenkräfte mit dem Schwingbeiwert  $S_W$  multipliziert werden. Angaben zum Schwingbeiwert sind der [DIN EN 528/09] zu entnehmen.

Bei betriebsmäßiger Anwendung und ungünstigsten Belastungen unter Verwendung der ungünstigsten Kippkante darf die Kippsicherheit  $v_S$  den Wert 1,5 nicht unterschreiten. In Ausnahmefällen, wie Betätigung des Notschalters oder Stromausfall darf die Kippsicherheit auch kleiner sein, jedoch den Wert 1,1 nicht unterschreiten.

#### *Instandhaltung*

Bei allen über 5 m hohen RBG muss entlang der gesamten Masthöhe eine Zugangsleiter vorhanden sein. Ab einer Höhe von 5 m muss die Leiter mit einem Sicherheitskorb oder einem Auffangsystem nach [DIN EN 363/08] und Klasse-A1 Verankerungspunkten an Übergangsstellen nach [DIN EN 795/12] ausgestattet sein. Leitern müssen mit geeigneten Einrichtungen ausgerüstet sein, um in Abständen von nicht mehr als 6 m eine Ruhemöglichkeit zu haben (z. B. Ruhepodeste oder Einrichtungen, um Personen sicher zu halten).

#### *Sicherheitsanforderungen in Bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit*

Das Regalbediengerät muss eine ausreichende Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen aufweisen, damit keine gefährlichen Ausfälle entstehen und ein bestimmungsgemäßer Betrieb gewährleistet werden kann. Die Arten und Ausmaße der Störungen, welche die Störfestigkeit des Gerätes bestimmen, sind in der [DIN EN 61000/11] zusammengefasst.

Folgende Funktionsstörungen bzw. -ausfälle dürfen nicht auftreten:

- unerwarteter Anlauf
- Sperren eines Not-Halt-Befehls oder Zurücksetzen einer Not-Halt-Funktion
- Deaktivierung eines Sicherheitskreises, einschließlich sicherheitsrelevanter Fehlererkennungsmöglichkeiten [DIN EN 528/09]

#### *Überprüfung der Sicherheitsanforderungen und/oder –maßnahmen*

Die Prüflast muss für das Lastaufnahmemittel geeignet und ihr Gewicht bis auf  $\pm 2\%$  nachzuprüfen sein. Die Prüflast ist die Nennlast plus Zusatzlast (z. B. Personen), multipliziert mit 1,25 für die statische Belastungsprüfung und 1,1 für die dynamische Prüfung.

Mit der Prüflast müssen alle vorgesehenen Bewegungen in den für die Beanspruchung ungünstigsten Laststellungen mit der gebotenen Vorsicht ausgeführt werden. Eine Bewegung darf erst eingeleitet werden, wenn Schwingungen aus vorangegangenen Bewegungen abgeklungen sind.

Bei der statischen Belastungsprüfung wird der Hubwagen mit der statischen Prüflast in einem Zeitraum von 5 min belastet. Danach werden alle tragende Elemente des RBG auf dauerhafte Verformungen und andere Schäden untersucht. Die Prüfung muss zweimal durchgeführt werden, um unzulässige bleibende Verformungen erkennen zu können.

Nach erfolgreich abgeschlossener statischer Prüfung wird die dynamische Prüfung durchgeführt. Dabei wird das RBG zuerst in allen Bewegungsrichtungen getrennt bis zur Nenngeschwindigkeit gefahren. Danach werden Bewegungsrichtungen überlagert. Im Anschluss sind das RBG inkl. der Geräte- und Sicherheitseinrichtungen auf ordnungsgemäßen Betrieb und ihre Funktion zu prüfen.

### **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen**

Im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurde eine Kosten-Wirksamkeits-Matrix aufgestellt und die Amortisierungszeit aus den Energiekosteneinsparungen ermittelt. Um die Alternativlösung – die Substitution des Mastwerkstoffs und konstruktive Anpassungen – unter wirtschaftlichen Aspekten zu bewerten, wird die Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) herangezogen. Diese Methode eignet sich gut bei Problemen, bei denen zwar die Inputs über Marktpreise bewertet, die Outputs dagegen nicht monetär gemessen werden können [Wol/05]. Bei RBG setzen sich die Inputs aus Entwicklungs-, Material-, Fertigungs- und Betriebskosten zusammen. Diesen gegenüber steht auf der Output-Seite die Umschlagleistung.

#### *Input*

Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen, für die bewährte Auslegungsregeln existieren, erfordert die Auslegung einer Faserverbundkonstruktion einen iterativen Prozess, der insbesondere die komplexen Wechselwirkungen von Konstruktion, Material und Fertigung berücksichtigt. Dazu ist ein ganzheitlicher, komplexer Entwicklungsansatz zu nutzen, der eine anforderungs- und belastungsgerechte Auslegung und funktionsintegrative Konstruktionen umfasst. Dafür anfallende Entwicklungskosten sind bauteilspezifisch und daher nur schwer ermittelbar.

Heute liegen die Kosten pro Kilogramm CFK noch etwa beim 10fachen von Stahl. Im Jahr 2030 könnte sich der Preis für CFK dem Preis von Aluminium nähern. CFK wäre dann nur noch knapp doppelt so teuer wie Stahl [Jah/12]. Aus der fertigungstechnischen Sicht variieren die Kosten je nach Bauteilgröße und -form. Diese können infolge höherer Werkzeug- und Prozesskosten bei CFK bis zu 3fach höher liegen [Ber/13].

Eine weitere Inputgröße bei der KWA sind die Betriebskosten. Diese setzen sich aus Reparatur-, Wartung- und Energiekosten zusammen, wobei die Wartungskosten bei Tragwerkstrukturen vernachlässigt werden können. Mäßige punktförmige Stoßbelas-

tungen, welche im Lagerbetrieb durch Kollisionen mit dem Hubmasten theoretisch möglich sind, können zu Delaminationen sowohl zwischen einzelnen Werkstoffschichten als auch zwischen Faser und Matrixwerkstoff führen. Aus der Luftfahrtindustrie ist jedoch bekannt, dass kleine Schäden bei CFK-Strukturen in den meisten Fällen durch vorgefertigte CFK-Platten kostengünstig und schnell behoben werden können [Ach/03]. Bei größeren Schäden ist der Reparaturaufwand von CFK und Stahl vergleichbar.

Bei den Energiekosten sind RBG mit Hubmasten aus CFK gegenüber Stahl deutlich im Vorteil. Durch die geringe Eigenmasse des CFK-Masts wird, bei gleicher Umschlagleistung, eine kleinere Energiemenge für die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge benötigt. Mit dem Einsatz von Leichtbauwerkstoffen kann eine Massenreduzierung des Masts bis zu 75 % erreicht werden. Bei Paletten-RBG, bei denen die Mastmasse bis zu 50 % der Gesamtmasse beträgt, ergibt sich dabei eine Masseinsparung von bis zu 37 %.

### Output

Die Outputgröße bei der KWA des RBG stellt die Umschlagleistung, d. h. Anzahl der Transporteinheiten pro Zeiteinheit dar. Durch den Einsatz von CFK-Masten wird die Schwingung aus den Anfahr- und Bremsvorgängen schneller abgedämpft und damit die Positionierzeit deutlich reduziert (vgl. Ausschwingvorgang in Abbildung 5).

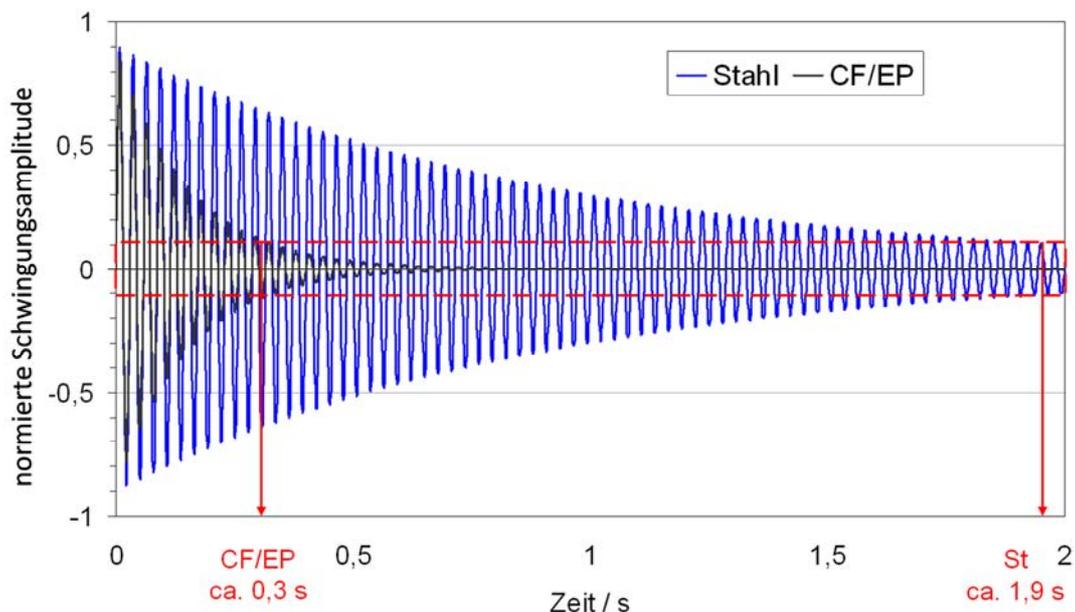


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Ausschwingvorgänge von Stahl und CF/EP

Aufgrund der höheren Werkstoffdämpfung klingt bei einem CF/EP-Probekörper (Kohlefaser (CF) in Epoxidharzmatrix (EP)) die Schwingungsamplitude bereits nach ca. 0,3 s auf 10 % der Anfangsauslenkung ab; wohingegen sich diese Abklingzeit bei einem Stahlprobekörper mit vergleichbarer Steifigkeit/Eigenfrequenz mehr als ver-

sechsfacht. Damit kann die Umschlagleistung des RBG insgesamt gesteigert werden.

### *Kosten-Wirksamkeits-Matrix*

Den Vergleich der Input- und Outputgrößen für die KWA für beide Mastvarianten ermöglicht Tabelle 2. Die einzelnen Kostenanteile für Entwicklung, Material, Fertigung, Betrieb sowie die Umschlagleistung werden auf einer Skala von 1 (gering, ein Stern) bis 10 (groß, 10 Sterne) beurteilt. Mit entsprechenden Wichtungsfaktoren ergeben sich die Kosten  $K_i$  und die Wirksamkeit  $W_i$  in Währungseinheiten.

**Tabelle 2: Vergleich von Kostenanteilen und Wirksamkeit für Stahl- und CFK-Masten**

Hubmast	Varianten-Nr. $i$	Kosten				Wirksamkeit	
		Entwicklung	Material	Fertigung	Betrieb	Umschlagleistung	Energieeffizienz
Stahl	1	*	*	*	***	**	*
CFK	2	***	*****	***	**	***	**

Um die alternative Mastkonstruktion hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zu bewerten, werden die Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisse  $V_i$

$$V_i = K_i / W_i \quad (1.2)$$

miteinander verglichen.

Für die Zahlenrechnungen sind die Daten des konkreten RBG einzusetzen.

### **Wahl des Referenzsystems**

Anhand der analysierten technischen und technologischen Parametern wurde bei der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PA) das Referenz-RBG ausgewählt: Es handelt sich um ein Einmast-Paletten-RBG mit geschweißtem Kastenprofil aus Stahl. Es stellt den typischen Vertreter in der Kategorie der Einmast-Paletten-RBG dar, der laut [Per/09] am häufigsten eingesetzt wird.

Die wesentlichen technischen Daten des Referenzsystems sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tabelle 3: Technische Daten des Referenzsystems**

<b>RBG Typ</b>	Einmast RBG
<b>Mastbauweise</b>	geschweißtes Kastenprofil aus Stahl
<b>Masthöhe</b>	ca. 32 m
<b>Traglast</b>	2 x 1000 kg

## 1.2 Analyse des Referenzsystems

### Analyse des mechatronischen Systems

Technologische Randbedingungen und Belastungen bilden die Basis für die Konzipierung und Konstruktion des Masts in Faserverbundbauweise. Mit den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Daten wurden Bewegungsprofile für den Mast erstellt, die bei der Mehrkörper-Simulation ihre Verwendung fanden. Das Schwingungsverhalten wurde für zwei relevante Lastfälle untersucht:

- 1. Fall Gassenfahrt, Fahrstrecke 30 m
- 2. Fall Auslagerungsvorgang, Ausschubstrecke 1,4 m

In beiden Fällen wird der Mast durch Massenkräfte in Schwingung versetzt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Bewegung des Masts zu analysieren und möglichst genau zu beschreiben.

Wie aus der Abbildung 4 zu erkennen ist, lässt sich der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf prinzipiell in drei Phasen einteilen:

- 1. Phase Anfahren (Beschleunigung)
- 2. Phase Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit (Beharrung)
- 3. Phase Bremsen (Verzögerung)

Es werden Bewegungsprofile mit konstanten Geschwindigkeitsanstiegen verwendet, siehe Abbildung 6 (1. Fall) und Abbildung 7 (2. Fall). Die Übergänge zwischen den einzelnen Phasen sind nicht verschliffen, d. h. die getroffene Annahmen sind konservativ.

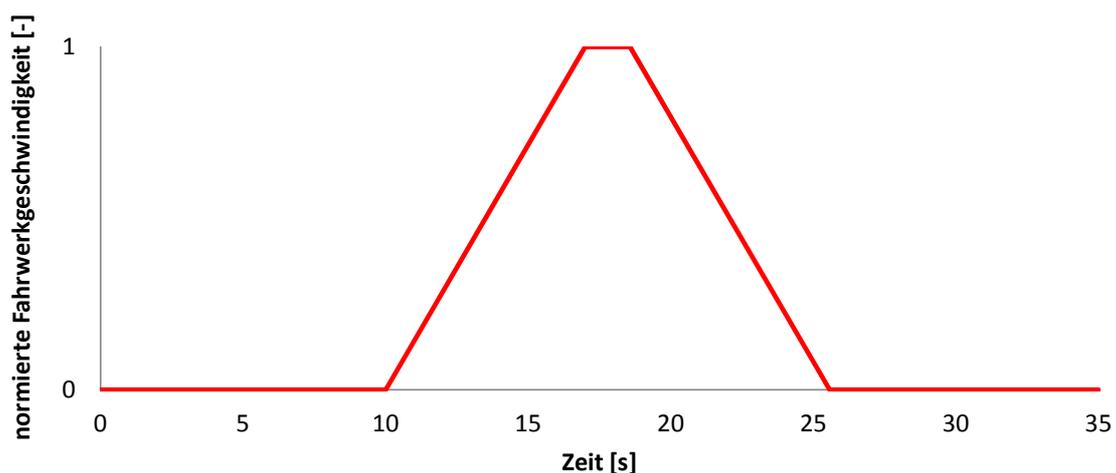


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverlauf auf max. Geschwindigkeit normiert, 1. Fall: Gassenfahrt (Fahrwerk)

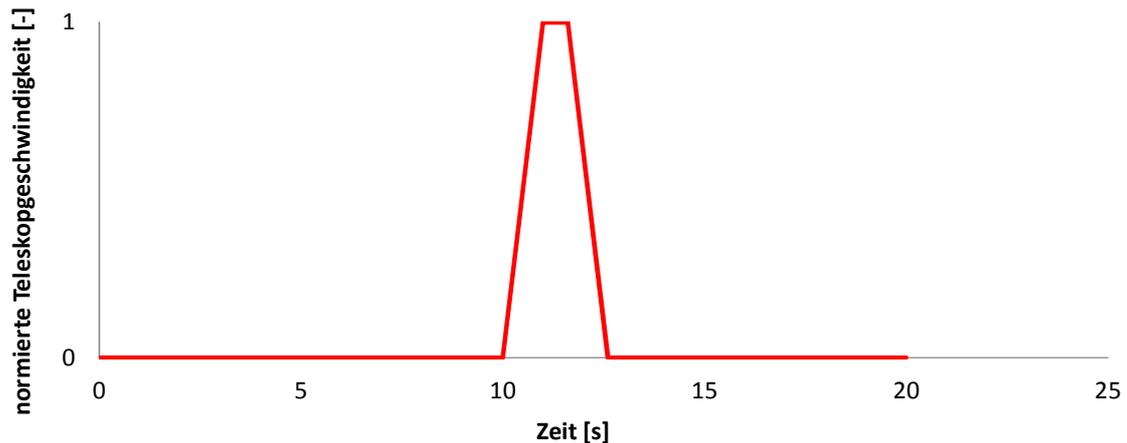


Abbildung 7: Geschwindigkeitsverlauf auf max. Geschwindigkeit normiert, 2. Fall: Auslagerungsvorgang (Teleskop)

### Beschreibung des Systemverhaltens bei Belastung

Um das Systemverhalten bei der realen Belastungen zu beschreiben, wurden sowohl Messungen an einem vergleichbaren RBG der Fa. Viastore durchgeführt als auch Messdaten von Herstellern ausgewertet. Folgende Messgrößen beschreiben das Systemverhalten:

- Wege und Geschwindigkeiten der Antriebe Fahrwerk, Hubwerk, Teleskopaus-schub
- Antriebsleistung des Fahrwerks und Hubwerks
- Hubmasse
- Verformungen am Hubmast

Um eine Validierung des Modells zu ermöglichen, wurden folgende Daten von Fa. Dambach zur Verfügung gestellt:

- 1. Eigenfrequenz, LAM in oberer Position (Schwingung in Gassenrichtung)
- Auslenkung des Masts in Gassenrichtung bei Belastung mit definierter Zugkraft am oberen Mastpunkt
- 1. Eigenfrequenz, LAM in mittlerer Position (Schwingung quer zu Gassenrichtung)

Die Messergebnisse am RBG der Fa. Viastore sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

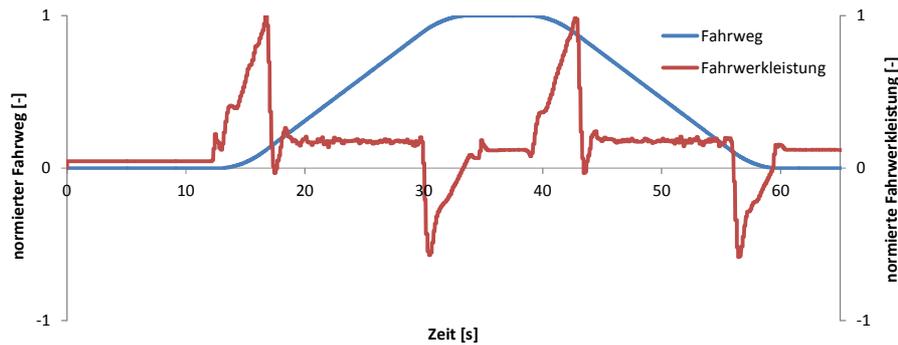


Abbildung 8: Fahrleistung- und Fahrwegverlauf bei Gassenfahrt; Messung Viastore RBG

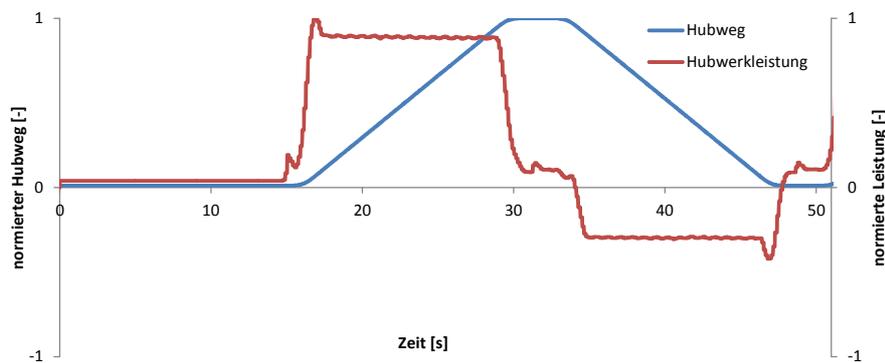


Abbildung 9: Hubleistung- und Hubwegverlauf; Messung Viastore RBG

### Definition von Grundanforderungen an Demonstratormasten

Folgende Grundanforderungen sind bei der Konzipierung und Fertigung von Demonstratormasten sowohl aus dem Referenzmaterial Stahl als auch aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) einzuhalten, um plausible Forschungsergebnisse zu erzielen:

- Übereinstimmung der geometrischen Bedingungen
- Einhaltung der Randbedingungen
- annähernd gleiches Schwingungsverhalten
- geringeres Eigengewicht und höheres Dämpfungsvermögen beim Masten aus FKV (Diese Anforderung soll unbedingt erfüllt sein, da diese das wesentliche Ziel des Forschungsvorhabens darstellt.)
- vergleichbarer Platzbedarf und Einhalten der Anfahrmaße
- Fertigbarkeit

Die Vereinfachung der Konstruktion betrifft in erster Linie die Versteifungselemente im Mastinnern. Mit dem Ziel der Fertigbarkeit von Stahl- und FKV-Demonstratormast wurde daher ein Grundquerschnitt ohne zusätzliche Versteifungselemente gewählt.

Als geometrische Bedingungen gelten die des Referenzsystems unter Berücksichtigung des Skalierungsfaktors. Demzufolge sollen die Demonstratormasten die Ab-

messungen 3200 x 170 x 36 mm nicht überschreiten. Eine Erhöhung der Wandstärken beim Masten aus FKV ist nur nach innen zulässig.

Eine weitere Anforderung an die Demonstratormasten stellen die Randbedingungen dar. Diese sollen dem Referenzsystem möglichst genau nachgebildet werden, um das Schwingungsverhalten im Versuchsfeld nicht zu verfälschen.

### Analyse des Schwingungsverhaltens

Das Schwingungsverhalten des Masts aus Stahl wird durch einen hohen Abstrahierungsgrad beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Geometrie des Masts so anzupassen, dass eine hohe Übereinstimmung mit dem Referenzsystem, bezogen auf die im Betrieb auftretenden Eigenfrequenzen erreicht wird. Zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Referenzsystems wurden zwei signifikante Schwingungsfälle in einer Modalanalyse untersucht. Im Ergebnis wurde eine abstrahierte Mastkonstruktion für den Demonstratormast abgeleitet, deren Schwingungsverhalten gut mit dem Referenzsystem übereinstimmt. Im Folgenden wird näher darauf eingegangen.

Beim Einmast-RBG werden grundsätzlich zwei signifikante Strukturschwingungsarten unterschieden. Bei der einen Schwingungsart handelt es sich um die Mastschwingung in Gassenrichtung (siehe Abbildung 10 links, Ersatzmasse näherungsweise in Mastachse dargestellt). Diese werden vor allem durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge des Fahrtriebs angeregt. Der prinzipielle Schwingungsverlauf des Masts nach der Beschleunigungsphase bzw. nach dem Bremsvorgang ist in Abbildung 11 dargestellt.

Vereinfacht lässt sich die Mast-Schwingungsbewegung durch folgende Differentialgleichung beschreiben [Nac/06]:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = a(t) \cdot m \quad (2.1)$$

$a$	Beschleunigung des Mast-Fußpunktes bzw. des LAM in z-Richtung	$[m/s^2]$
$x$	Weg des Ersatzmassenpunktes	$[m]$
$\dot{x}$	Geschwindigkeit des Ersatzmassenpunktes	$[m/s]$
$\ddot{x}$	Beschleunigung des Ersatzmassenpunktes	$[m/s^2]$
$m$	Ersatzmasse (Mast, Hubeinheit, Umschlaggut)	$[kg]$
$d$	Dämpfungskonstante des Masts	$[N \cdot s/m]$
$k$	Steifigkeit des Masts	$[N/m]$

Mit

$$k = \frac{3E \cdot I}{l^3} \quad (2.2)$$

$E$	Elastizitätsmodul des Balkens	$[N/mm^2]$
-----	-------------------------------	------------

- $I$  Flächenträgheitsmoment des Balkens  $[mm^4]$
- $l$  wirksame Schwinglänge des Balkens  $[m]$

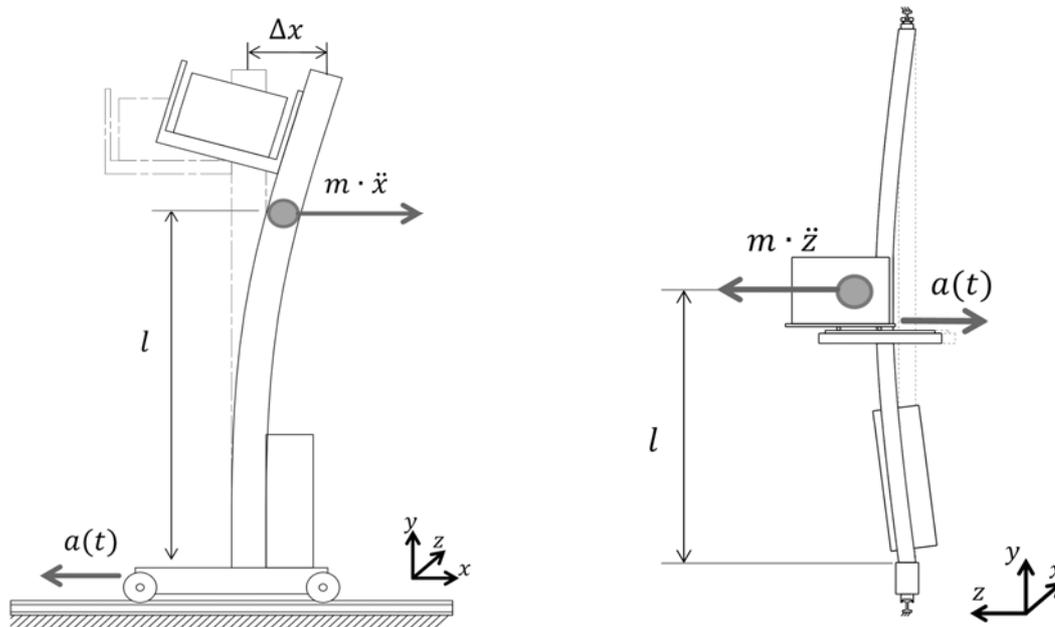


Abbildung 10: Strukturschwingungen am Einmast RBG; Schwingung in Gassenrichtung (links); Schwingung quer zur Gasse (rechts)

Wie aus der Gl. (2.1) zu erkennen ist, hängen Schwingungsamplitude und -dauer von Größen und Parametern des RBG ab, zum Beispiel:

- Größe und Lage des Schwerpunkts der Ersatzmasse
- Steifigkeit des Masts
- Dämpfungskonstante des Masts
- Beschleunigung des Mast-Fußpunktes in x- bzw. des LAM in z-Richtung



Abbildung 11: Schematische Darstellung des Schwingungsverhaltens beim Anfahren und Abbremsen eines RBG

Bei der zweiten Schwingungsart handelt es sich um die Mastschwingungen quer zu Gassenrichtung (siehe Abbildung 10 rechts). Diese entstehen durch die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge des Lastaufnahmemittels beim Ein- und Auslagern von Umschlaggut, wobei die höchsten Schwingungsamplituden beim Ein- und Auslagern in mittleren Regalhöhen erreicht werden.

Das Verhalten eines Schwingungssystems kann anhand einer Modalanalyse beschrieben werden. In der Modalanalyse werden die Eigenfrequenzen und dazugehörige Eigenformen bestimmt. Wird ein System in Schwingung versetzt, so setzt sich sein Schwingungsverhalten aus Überlagerung der Eigenformen zusammen. Dabei bestimmt die Erregerfrequenz, ob eine bestimmte Eigenform und Eigenfrequenz das Schwingungsverhalten dominiert.

Eine Modalanalyse wurde zunächst am Referenzmast durchgeführt. Dafür hat die Fa. Dambach die CAD-Daten der Mastgeometrie sowie die notwendigen Angaben zu den Ersatzmassen der Anbauteile zur Verfügung gestellt. Die Modalanalyse beinhaltet folgende Schritte:

- Werkstoffannahmen
- Definition der Randbedingungen am Referenz-Mast
- Aufbringen von Punktmassen
- Berechnung der Eigenfrequenzen und dazugehörigen Eigenformen für zwei Fälle
  - 1. Fall: Lastaufnahmemittel in der oberen Position – Worst Case für Horizontalschwingung
  - 2. Fall: Lastaufnahmemittel in der mittleren Position – Worst Case für Querschwingung

### *Werkstoffannahmen*

Die in die Berechnung eingehende Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

**Tabelle 4: Werkstoffkennwerte**

Werkstoffbezeichnung	S235JR
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	360
Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	235
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	7,85
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$2,1 \cdot 10^5$
Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	$7,69 \cdot 10^4$
Querkontraktionszahl [-]	0,3

### Definition der Randbedingungen

Die Randbedingungen für das FE-Modell sind in Abbildung 12 dargestellt.

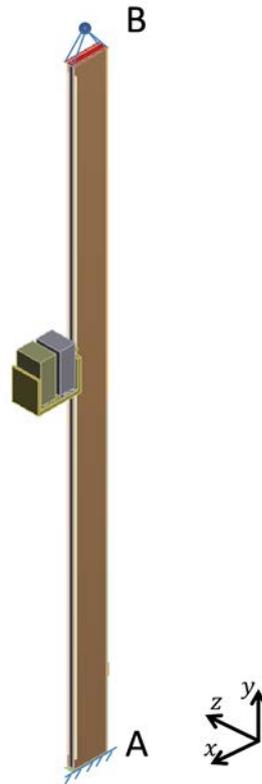


Abbildung 12: Randbedingungen am FE-Modell

Die Lagerung des Masts erfolgt an zwei Stellen – A und B. Der Mast ist im Lager A fest eingespannt. Diese Vereinfachung ist zulässig, da die Optimierung des Schwingungsverhaltens im Forschungsvorhaben nur den Mast betrifft – Einflüsse der Fahrwerkkonstruktion und Schienen werden nicht betrachtet. Lager B bildet die gelenkige Lagerung des Masts in der oberen Führungsschiene nach. Diese wurde über einen externen Punkt B, der mit der Kopfplatte des Masts verbunden ist, realisiert.

In Tabelle 5 ist die Konfiguration der Freiheitsgrade einzelner Lagerstellen zusammengefasst.

Tabelle 5: Lagerkonfiguration des FE-Modells

Lagerung	x-Verschiebung	y-Verschiebung	z-Verschiebung	x-Rotation	y-Rotation	z-Rotation
A	fest	fest	fest	fest	fest	fest
B	-	fest	-	-	-	fest

### Lastannahmen

Am Mast werden Punktmassen angeordnet, um die Trägheiten der Anbauteile, wie zum Beispiel Hubwerk, Nutzlast, Schaltschrank nachzubilden. Zur Positionierung der Punktmassen siehe Anlage B.

Für den 2. Fall wurde der Hubwagen um 12 m abgesenkt.

Modalanalyse

Aufbauend auf den Ergebnissen der Modalanalyse des Referenzsystems erfolgte die Abstrahierung der Mastkonstruktion. Ziel dieser Abstrahierung war es, einen Mast mit konstantem Querschnitt und ohne innere Versteifungsbleche abzuleiten. Dabei sollten die Eigenfrequenzen und dazugehörige Eigenformen beider Systeme möglichst gut übereinstimmen. Dieser iterative Prozess beinhaltete folgende Schritte:

- Berechnung der Eigenfrequenzen und dazugehörigen Eigenformen
- Vergleich der Ergebnisse mit Referenzsystem
- Anpassung der Geometrie

In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die Eigenfrequenzen und Eigenformen des Referenzmasts und des abstrahierten Masts im Vergleich dargestellt.

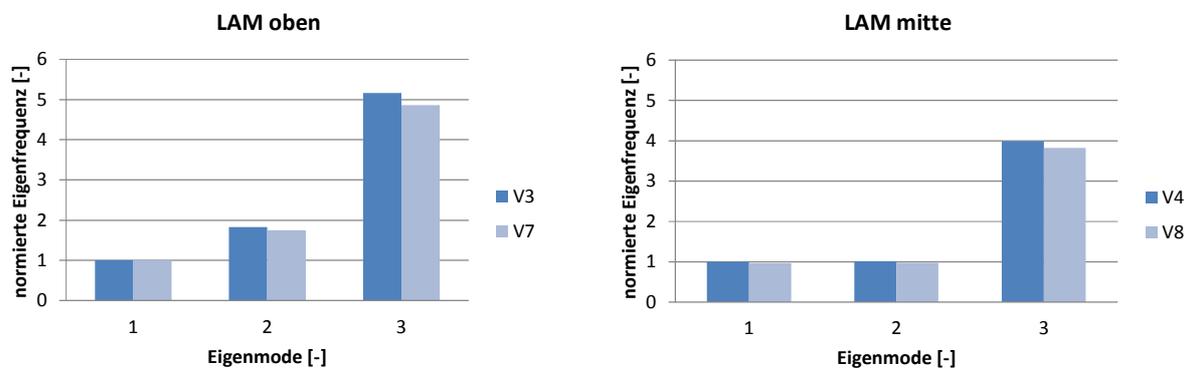


Abbildung 13: Vergleich der Eigenfrequenzen, normiert auf 1. Eigenfrequenz des Referenzmasts; Referenzmast (V3, V4), abstrahierter Mast (V7, V8)

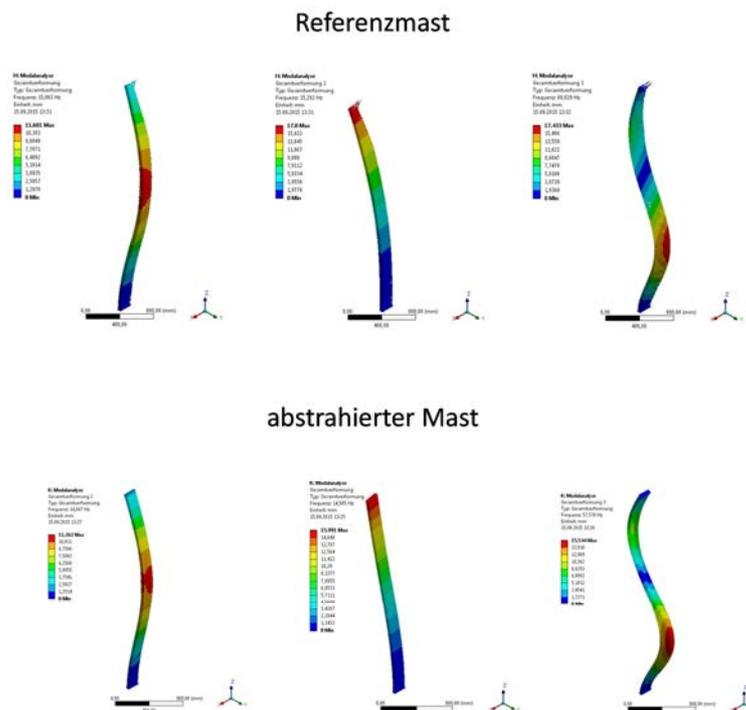


Abbildung 14: Vergleich der Eigenformen des Referenzmasts und abstrahierten Masts; 2. Lastfall

Es ist eine gute Übereinstimmung der Eigenfrequenzen des Referenzmasts und des abstrahierten Masts zu erkennen.

Die abgeleitete Mastgeometrie dient für weitere Untersuchungen im Rahmen der Simulation. Weiterhin stellt der abstrahierte Mast die Grundlage für die Gestaltung der Demonstratormasten dar.

### Definition von Belastungskollektiven

Für die Definition von Belastungskollektiven wurde ein häufig auftretendes Lastspiel analysiert, aus dem die Belastungskollektive für zwei relevante Lastfälle abgeleitet wurden. Das Belastungskollektiv setzt sich aus Belastungsart, -höhe und Häufigkeit des Auftretens zusammen. Die Lastannahmen erfolgten in Anlehnung an [DIN 15350/92]. Für das Belastungskollektiv wurden nur die Hauptlasten berücksichtigt.

Hauptlasten sind:

- Eigenlasten
- Hublasten
- Massenkräfte aus betriebsmäßigen Bewegungen
- statische Führungskräfte

Es wurden zwei Regellastfälle betrachtet. Der 1. Lastfall ist die Gassenfahrt und setzt sich aus den Lasten entsprechend Tabelle 6 zusammen:

**Tabelle 6: Lasten und Beiwerte für den 1. Lastfall**

Lastarten und Beiwerte	Symbol	Last
Gewichtskraft der Eigenlast	$G_E$	$G_E \cdot \varphi$
Eigenlastbeiwert	$\varphi$	
Gewichtskraft der Hublast	$G_{Hu}$	$G_{Hu} \cdot \psi$
Hublastbeiwert	$\psi$	
Massenkräfte in x-Richtung (Fahrtrichtung)	$F_X$	$F_X \cdot S_W$
Schwingbeiwert	$S_W$	

Der 2. Lastfall ist die Übergabe-/bzw. Übernahme der Palette und setzt sich aus den Lasten entsprechend Tabelle 7 zusammen:

**Tabelle 7: Lasten und Beiwerte für 2. Lastfall**

Lastarten und Beiwerte	Formelzeichen	Last
Gewichtskraft der Eigenlast	$G_E$	$G_E \cdot \varphi$
Eigenlastbeiwert	$\varphi$	
Gewichtskraft der Hublast	$G_{Hu}$	$G_{Hu} \cdot \psi$
Hublastbeiwert	$\psi$	
Kräfte bei Übergabe/ Übernahme der Ladeinheit	$F_L$	$F_L \cdot S_W$
Schwingbeiwert	$S_W$	

Die Bestimmung der Häufigkeit des Auftretens einer bestimmten Last erfolgte anhand der Spielzeitanalyse. Als Referenz wurde der 1. Fall – Ein- und Auslagerung am unteren Eckpunkt – nach [FEM 9.851/03] gewählt. Dieser stellt einen der häufigsten Anwendungsfälle in der Praxis dar. Der prinzipielle Ablauf ist in Abbildung 15 dargestellt. Es ist zu betonen, dass diese Annahme eine Vereinfachung der Spielzeitanalyse darstellt, da in [FEM 9.851/03] nur RBG mit einem Lastaufnahmemittel betrachtet werden.

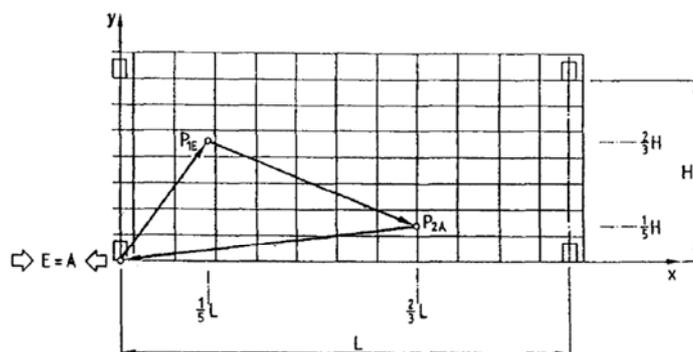


Abbildung 15: Ablauf eines kombinierten Spiels; 1. Fall nach [FEM 9.851/03]

Die Ermittlung der Teilzeiten erfolgte für eine  $H = 30$  m hohe und  $L = 80$  m lange Lagerfront. Die Koordinaten der Übernahmeposition für Einlagerungen  $E$  und Übergabeposition für Auslagerungen  $A$  sowie der theoretischen Bezugspunkte  $P_{1E}$  und  $P_{2A}$  sind in Tabelle 8 enthalten.

Tabelle 8: Koordinaten angenommener Lagerpunkte

Punkt	x-Koordinate [m]	y-Koordinate [m]
$E$	0	0
$A$	0	0
$P_{1E}$	16	20
$P_{2A}$	53	6

Bei Kenntnis der Koordinaten aus Tabelle 8 können mit den technischen Parametern Geschwindigkeit und Beschleunigung für Fahrwerk, Hubwerk und Teleskopausschub des RBG die Teilspielzeiten für das kombinierte Spiel (siehe Abbildung 15) berechnet werden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 16 dargestellt.

Das Referenz-RBG wurde für eine Nutzungsdauer von 15 bis 20 Jahre ausgelegt. Bei einem Einsatz von 20 Stunden je Tag und 6 Tagen je Woche entspricht das einer Gesamtlaufzeit von 90.000 Stunden bei 300 Arbeitstagen im Jahr.



Tabelle 9: Belastungskollektiv für den 1. Lastfall

	Dauer [%]	Eigenlast [%]	Hublast [%]		Massenkraft in x-Richtung [%]	
		$G_E \cdot \varphi$	$G_{HuL} \cdot \psi$	$G_{HuR} \cdot \psi$	$F_{XL} \cdot S_W$	$F_{XR} \cdot S_W$
1. Laststufe	10	100	100	100	100	100
2. Laststufe	40	100	70	100	70	100
3. Laststufe	20	100	50	100	50	100
4. Laststufe	30	100	0	100	0	100

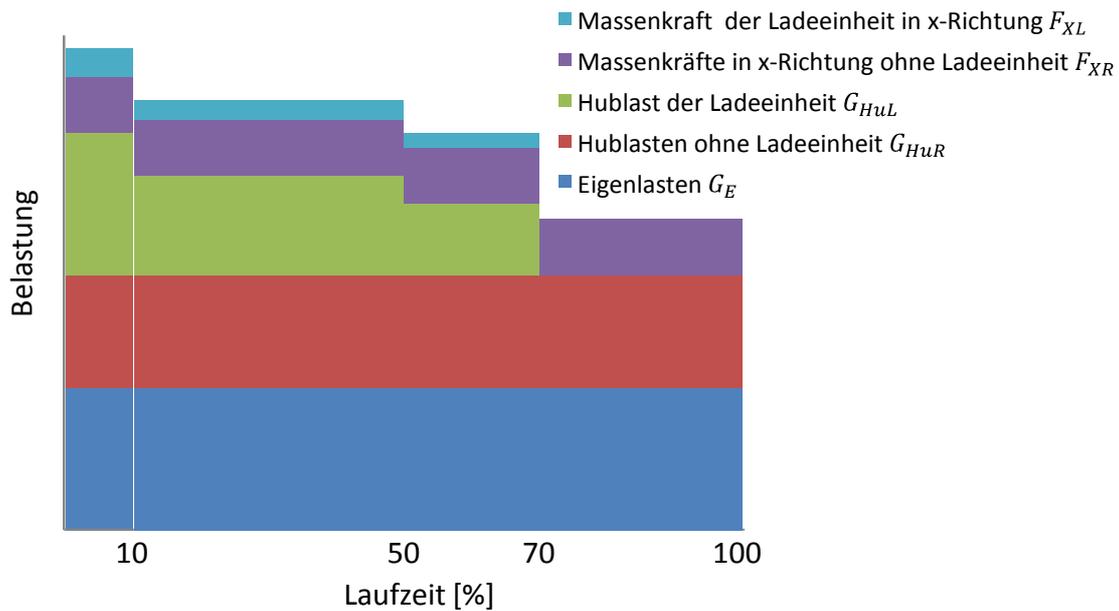


Abbildung 17: Belastungskollektiv für den 1. Lastfall

2. Lastfall

Der 2. Lastfall tritt beim Ein- bzw. Ausfahren der Teleskopgabel auf. Bei einem kombinierten Spiel beträgt der Zeitanteil diese Vorgänge ca. 19 % der Spielzeit.

Daraus ergibt sich das Lastkollektiv nach Tabelle 10 bzw. Abbildung 18.

Tabelle 10: Belastungskollektiv für 2. Lastfall

	Dauer [%]	Eigenlasten [%]	Hublasten [%]		Massenkräfte in z-Richtung [%]	
		$G_E \cdot \varphi$	$G_{HuL} \cdot \psi$	$G_{HuR} \cdot \psi$	$F_{LL} \cdot S_W$	$F_{LR} \cdot S_W$
1. Laststufe	10	100	100	100	100	100
2. Laststufe	40	100	70	100	70	100
3. Laststufe	20	100	50	100	50	100
4. Laststufe	30	100	0	100	0	100

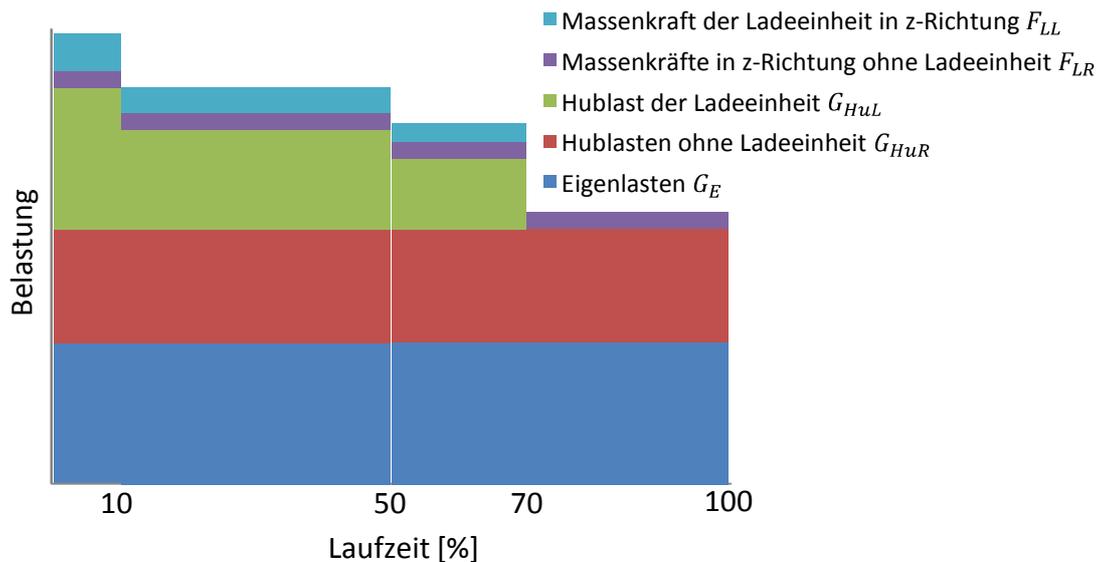


Abbildung 18: Belastungskollektiv für 2. Lastfall

Lastfall 1 und Lastfall 2 haben gemeinsam einen Anteil von 72 % am kombinierten Spiel. Die restlichen 28 % nehmen Positionieren sowie Anheben und Absetzen der Ladeeinheit beim Ein- bzw. Auslagern in Anspruch.

## 1.3 Konzeption und Konstruktion alternativer Leichtbauweisen

### Identifizierung von alternativen Werkstoffen und Bauweisen

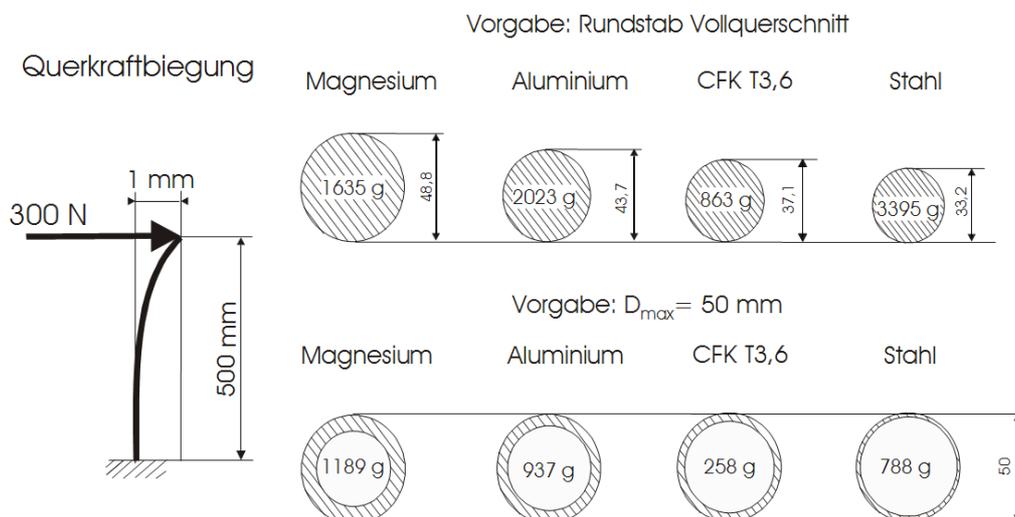
Grundlage für die Gestaltung eines alternativen Mastsystems bildet die Recherche nach geeigneten alternativen Werkstoffen, die sich hinsichtlich der mechanischen Kennwerte als Mastkonstruktionswerkstoff eignen und gleichzeitig ein verbessertes Dämpfungsvermögen gegenüber Stahl aufweisen. Zu den betrachteten Materialien zählen die gängigen metallischen Konstruktionswerkstoffe, wie Aluminium und Magnesium. Auch berücksichtigt wurden spezielle Metall(-Verbund)-Sandwich-Werkstoffe wie „BONDAL®“ und „Hybrix™“, welche jedoch wegen der geringen Materialstärken nicht für große Lastaufnahmen der RBG-Masten geeignet sind.

Weiter wurden Verbundwerkstoffe als alternative Werkstoffgruppe betrachtet. Dazu zählen auch Holzwerkstoffe. Diese bieten als Furnierschichthölzer (FSH) die Möglichkeit, ein Material mit reproduzierbaren Werkstoffkennwerten zu produzieren und weisen dabei gleichzeitig hohe Dämpfungseigenschaften aus. Jedoch muss aufgrund der geringen mechanischen Kennwerte mit großen Wandstärken geplant werden.

Ein wachsende Verbreitung als Konstruktionswerkstoff auch außerhalb des Luft- und Raumfahrtbereichs erzielen im Abschnitt 1.2 angesprochenen FKV. Dazu zählen Systeme mit hochsteifen Kohlefasern (CF) und weniger steifen Glasfasern (GF), eingebettet in Epoxidharz (EP), die den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK)

bzw. den glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) bilden. Diese wurden zur weiterführenden Untersuchung aufgrund ihrer vorteilhaften Materialkennwerte wie niedrige Dichte, hohe Festigkeit, hohe spezifische Steifigkeit sowie einstellbares Energieabsorptionsvermögen ausgewählt.

Der Zusammenhang von Werkstoff und Bauweise wurde am Beispiel der Steifigkeitsanpassung durch Variation des Querschnitts mit verschiedenen Werkstoffen erarbeitet und die Vorteile eines belastungsangepassten Querschnittsverlaufs genutzt. Vereinfacht betrachtet entspricht die Belastung eines RBG beim Anfahren bzw. Abbremsen einem einseitig eingespannten Biegebalken mit einer am freien Ende wirkenden Kraft; dies wird für die Auslegung eines RBG-Masts im ersten Konzeptentwurf angenommen. Abbildung 19 zeigt, dass unter der Vorgabe einer konstanten Durchbiegung die Wahl des Konstruktionswerkstoffes einen deutlichen Einfluss auf die Dimension und die Masse des Balkens hat. Es ist zu erkennen, dass Balken mit einem Vollquerschnitt aus Stahl aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls schlanker ausgeführt werden können als beispielsweise CFK-Vollprofile. Gleichzeitig ist durch die deutlich höhere Dichte von Stahl gegenüber CFK die Masse des Stahlträgers bedeutend höher als die des CFK-Trägers. Analog gilt dieser Zusammenhang für Hohlprofile mit gleichen Außenabmessungen, bei denen die Wandstärke seitens des CFK-Profils zwar höher, die Masse jedoch geringer ist. Soll ein Träger bei gleichbleibender Masse steifer konstruiert werden, muss daher auf einen Werkstoff mit einem dichtespezifisch hohen Elastizitätsmodul zurückgegriffen werden.



**Abbildung 19: Realisierung der gleichen Durchbiegung bei Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe**

Berechnungen zur Konzeptionierung zeigen, dass ein biegebelastangepasster Querschnittsverlauf eine deutliche Reduktion der Durchbiegung mit sich bringen kann. Bei der in Abbildung 20 dargestellten Berechnung wurde zur Überprüfung dieses Effektes ein einseitig eingespannter Stahlträger von 10 Metern Länge mit einer Einheitslast von 100 N am freien Ende beaufschlagt. Bei gleicher Masse der

Träger konnte die Durchbiegung bei Verwendung des biegeelastangepassten Profils um 75 % reduziert werden. Die Abmessungen der Profilquerschnitte können Abbildung 20 entnommen werden.

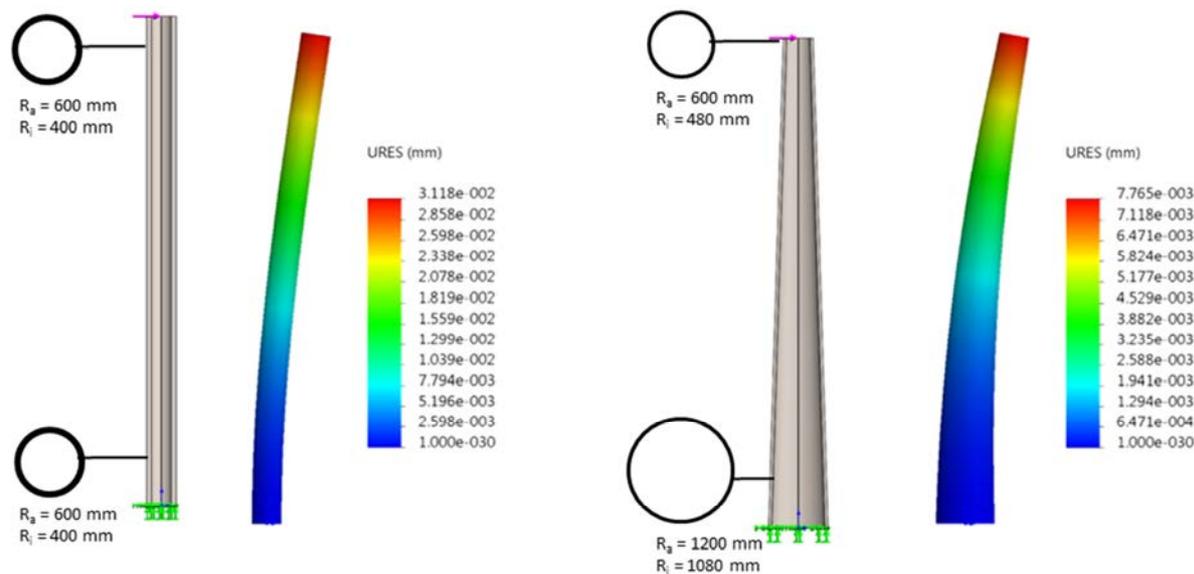


Abbildung 20: Durchbiegung zweier Hohlprofile gleicher Masse, Kraft am freien Ende

### Möglichkeiten zur Dämpfung der Konstruktion

Die Hubmasten von Regalbediengeräten neigen aufgrund ihrer schlanken Geometrie, der Massenverteilung und Anregungsmechanismen insbesondere zu Biegeschwingungen. Zur Reduzierung der Schwingungsamplituden und zur Verkürzung der Ausschwingzeit können sowohl aktive Maßnahmen als auch passive Maßnahmen ergriffen werden (vgl. Abbildung 21).

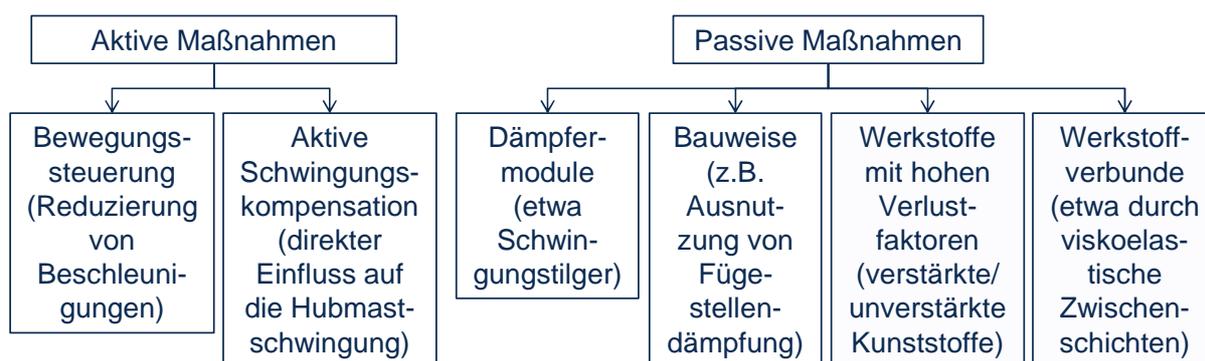


Abbildung 21: Mögliche Maßnahmen zur Schwingungsreduktion an Regalbediengeräten

Der Fokus zur Dämpfung der Mastschwingungen wird auf passive Dämpfungsmaßnahmen gelegt, insbesondere auf werkstoffintegrierte Maßnahmen, da diese im Vergleich zu den aktiven Maßnahmen keinerlei aufwändige Steuerung und Regelung benötigen. Insbesondere FVW bieten hierfür ein – im Vergleich zu metallischen Werkstoffen – hohes Dämpfungsvermögen, das es gilt, gezielt auszunutzen. Zudem

besteht aufgrund des schichtweisen Aufbaus von FVW auch die Möglichkeit, schwingungsdämpfende Zwischenschichten einzubringen, was bei metallischen Werkstoffen nicht bzw. nur schwer innerhalb des Fertigungsprozesses möglich ist. So wurden für die Demonstratormasten neben einem reinen CFK-Aufbau auch Aufbauten mit CFK und zusätzlichem thermoplastischen Elastomer (TPE) realisiert. Als TPE wurde eine thermoplastisches Polyurethan (TPU) als Folie mit 0,2 mm Dicke von BASF (Material: Elastollan 1185 A) ausgewählt; wesentliche Werkstoffeigenschaften zeigt Tabelle 11.

**Tabelle 11: Werkstoffeigenschaften TPU-Folie BASF Elastollan 1185 A [URL2]**

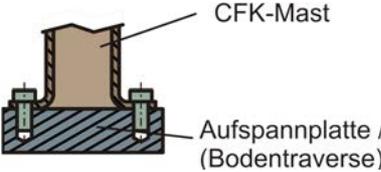
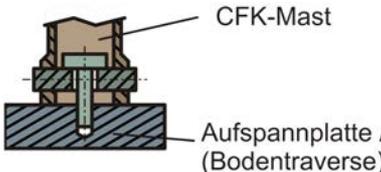
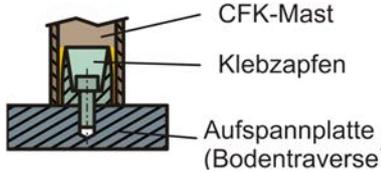
Eigenschaft	Elastollan 1185 A
Härte [Shore A]	87
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,12
Zugfestigkeit [MPa]	35,9
Reißdehnung [%]	530
E-Modul [MPa]	20,6

### **Definition von Funktionsflächen (Funktionsintegration)**

Für die Funktionsgewährleistung des RBG sind eine Vielzahl von Funktionsstellen und somit -flächen vorhanden. Am Mast sind dies zum einen die Lauf- und Führungsschiene des Hubwagens, zum anderen sind es die Verbindungsstellen zur Anbindung von Bodentraverse und Kopfträger. Hinzu kommen Aufnahme-/Anschraubpunkte für Hubantrieb, Leiter, Wartungspodest und Verbindungsstellen der Mastsegmente bei einer segmentierten Mastausführung.

Die Führungsschiene ist hinsichtlich der Reibung stark beansprucht. Um eine Aussage zur Eignung von CFK bzw. GFK als Werkstoff zur Gestaltung dieser Funktionsstellen treffen zu können, sind detailliertere tribologische Untersuchungen notwendig. Hinsichtlich der Lastübertragung ist die Anbindungsstelle des Kopfträgers vor allem zur Bodentraverse am anspruchsvollsten und wurde somit fokussiert betrachtet. In Tabelle 12 sind stilisierte Konzepte zur Gestaltung der Verbindung von Mast und Bodentraverse dargestellt. Dazu wurden Eigenschaften im Hinblick auf die entwickelten Demonstratormasten erarbeitet.

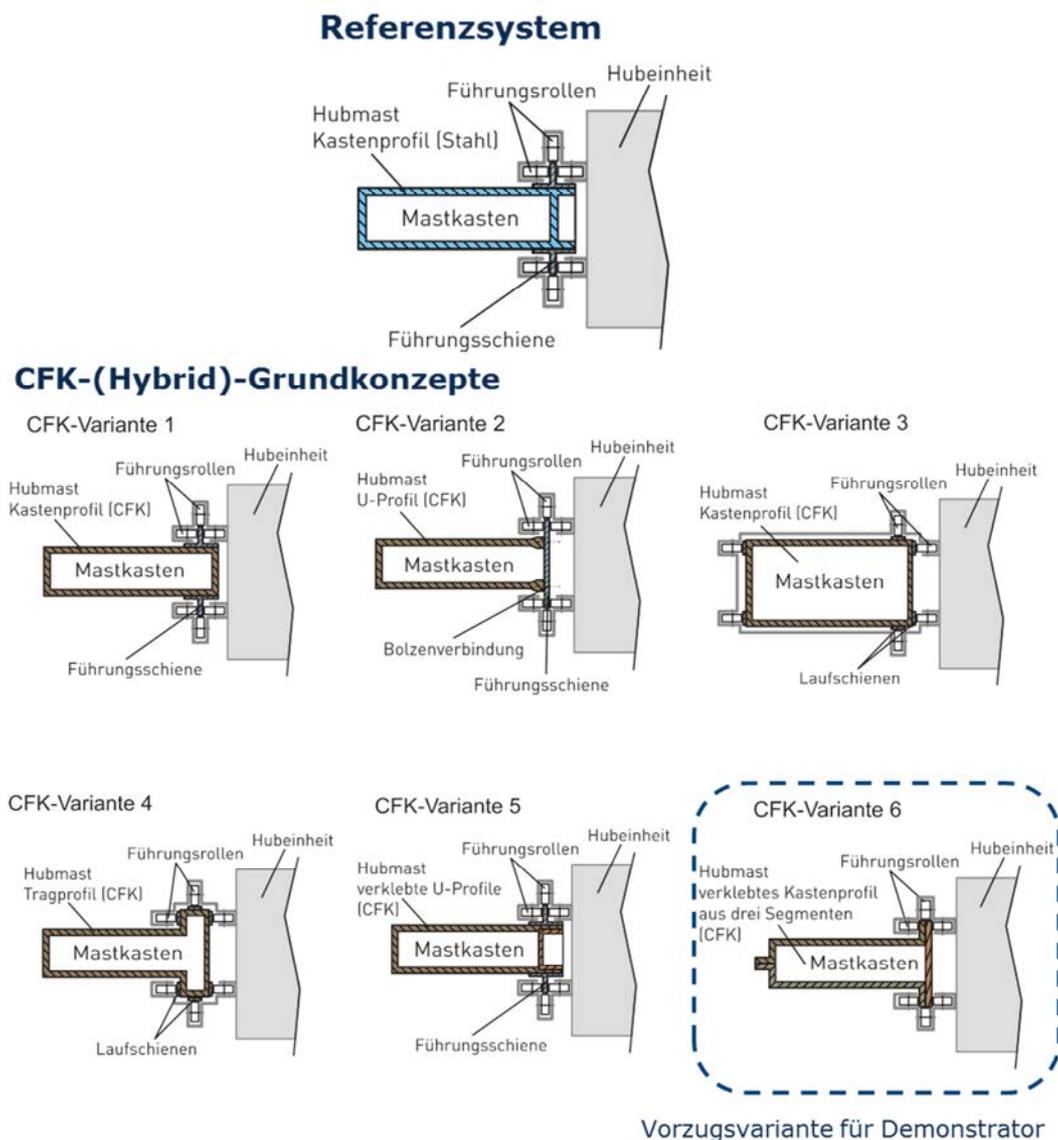
Tabelle 12: Anbindungskonzepte von CFK-Mast und Traverse

Flanschverschraubung	Bolzenverspannung	Zapfenverklebung
 <p>CFK-Mast Aufspannplatte / (Bodentraverse)</p>	 <p>CFK-Mast Aufspannplatte / (Bodentraverse)</p>	 <p>CFK-Mast Klebzapfen Aufspannplatte / (Bodentraverse)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faserverlauf nicht kraftflussgerecht</li> <li>• Viel Bauraum (insb. in radialer Richtung) beim Demonstrator nötig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lokale Laminataufdickung notwendig</li> <li>• Lasteinleitung durch Lochleibung nur punktuell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächige und steifigkeitsangepasste Lasteinleitung</li> <li>• Kein zusätzlicher Bauraum notwendig</li> </ul>

Für den Demonstrator wurde die Variante mit einem eingeklebten Flanschzapfen ausgewählt. Diese ermöglicht auch bei relativ dünnen Wandstärken und kleine Abmessungen eine nahezu spannungsspitzenfreie Lastübertragung von Anbindungselement in den Mast. Zudem ist diese Ausführung auch faserverbundgerecht umsetzbar.

### Konstruktive Gestaltung von Vorzugsvarianten

Auf Grundlage des ausgewählten Referenzsystems mit seinen Abmessungen und Lasten wurden Grundkonzepte zur Gestaltung von Mastvarianten mittels Faserverbundwerkstoff in CFK-(Hybrid-)Bauweise erarbeitet. Dabei sollten die Funktionen und der Bauraum des Referenzsystems beibehalten und die fertigungstechnische Umsetzung gewährleistet werden. In Abbildung 22 sind die erarbeiteten Konzeptvarianten dargestellt.



**Abbildung 22: Mast-Bauweisen und -Anschlüsse**

Für den Demonstrator wurde eine Skalierung von ca. 1:10 gewählt. Bedingt durch den hohen Schlankheitsgrad und die skalierungsbedingt geringe Querschnittsfläche wurde eine Bauweise mit nahezu ebenen Segmenten gewählt, welche verklebt wurden.

Für den Laminataufbau wurden notwendige Einzellagen definiert. Eine  $0^\circ/90^\circ$  Gewebelage im Außenbereich ist impactresistenter im Vergleich zu einer Gelegelage und erleichtert die Entnahme des Masts aus der Form bei der Fertigung. Eine  $\pm 45^\circ$  Gewebelage im Laminatinnenbereich erhöht die Torsionssteifigkeit der Struktur signifikant. Zwischen den beiden genannten Lagen wurden unidirektionale Lagen platziert, um die nötige Steifigkeit in der Hauptschwingungsrichtung (Biegung) zu erreichen. Dieser Grundaufbau wurde in Variation zur Auslegung des Masts verwendet.

## 1.4 Kennwertermittlung

Die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte der verwendeten Faserverbundwerkstoffe am definierten Verbundaufbau wurden in Zugversuchen ermittelt. Die Ergebnisse dienen als Datenbasis für die Berechnungen mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM).

Für die Auslegung der Demonstratormaststruktur wurden neben den Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten auch die Verlustfaktoren der verwendeten Faserverbundwerkstoffe bestimmt. Ergebnis dieser mit dem Biegeresonanzversuch durchgeführten Werkstoffcharakterisierung sind die richtungsabhängigen dynamischen Biegesteifigkeiten und Dämpfungen der ausgewählten Werkstoffe CF/EP und GF/EP.

## 1.5 Simulation

Die Mehrkörpersimulation ausgewählter Bewegungsabläufe dient zur Analyse des Bewegungsverhaltens des RBG. Sie wurde am abstrahierten Mast aus Stahl und CFK mit dem Berechnungsmodell aus Abschnitt 1.2 durchgeführt. Die Werkstoffannahmen, Randbedingungen und Lasten wurden übernommen. Als Erregungsgrößen wurden die aufgestellten Bewegungsprofile für zwei die Lastfälle Gassenfahrt und Auslagerungsvorgang eingesetzt.

Um das Schwingungsverhalten möglichst genau abbilden zu können, wurde der Mast als flexibler Körper modelliert, dessen Vernetzung mit Schalen-Elementen ausgeführt wurde. Als Simulationsumgebung wurde ANSYS Workbench 16.2 eingesetzt.

Bei der Mehrkörpersimulation wurde der Abklingvorgang nach dem Abbremsen ausgewertet. Dabei wurde die Dämpfung bestimmt sowie die Zeit  $t_a$  nach dem Bremsvorgang bis zum Abklingen der Schwingung auf 20 % der Anfangsamplitude  $a_{max}$  gemessen (vgl. Abbildung 23). Die Ergebnisse der Mehrkörpersimulation sind auf die Stahlmasten (Variante A) normiert und in der Tabelle 14 zusammengefasst.

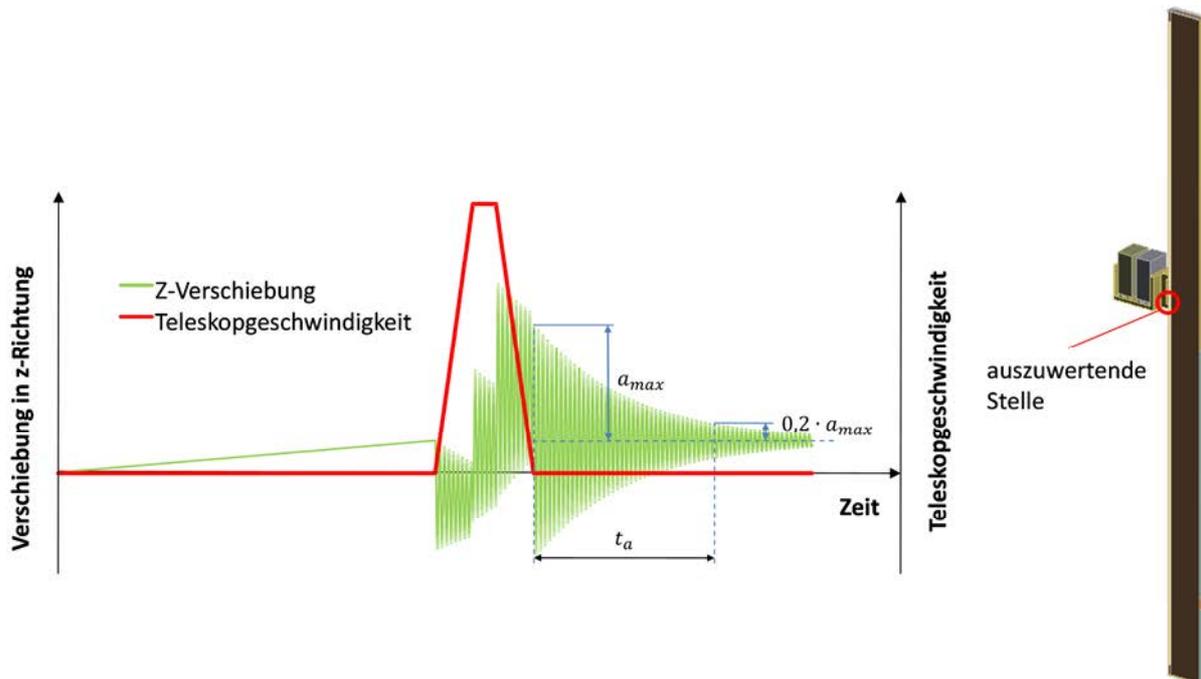


Abbildung 23: Ermittlung der Abklingzeit  $t_a$

Mit der FEM wurden die modalen Dämpfungsparameter des Masts auf Grundlage der richtungsabhängigen Materialeigenschaften von klassischen uni- und bidirektionalen kohle- oder glasfaserverstärkten Epoxidlagen berechnet. Dadurch wurde das strukturelle Schwingverhalten des Masts unter Einfluss von Lasten beschrieben, bewertet und optimiert. Es wurden zwei unterschiedliche Verbundwerkstoffe untersucht und mit einem aus Stahl hergestellten Referenzmast verglichen. Der dem Stand der Technik entsprechende, aus Stahl gefertigte Referenzmast wurde zunächst abstrahiert und anschließend skaliert. Hochsteife Kohlefasern, eingebettet in Epoxidharz (CFK), und Glasfasern, ebenfalls in Epoxidharz eingebettet (GFK), wurden aufgrund ihrer vorteilhaften Materialkennwerte von niedriger Dichte, hoher Festigkeit, hoher spezifischer Steifigkeit sowie einstellbarem Energieabsorptionsvermögen untersucht.

Für die Auslegung des Lagenaufbaus wurden sowohl die belastungsgerechte Faserorientierung als auch Fertigungseinflüsse durch die Verwendung von 0,4 mm starken Gewebe- und 0,2 mm Nicht-Gewebelagen berücksichtigt. Eine  $0^\circ/90^\circ$  Gewebelage erleichtert die Entnahme des Masts aus der Form, eine  $\pm 45^\circ$  Gewebelage erhöht die Torsionssteifigkeit der Struktur signifikant. Zwischen den beiden Lagen wurden einige unidirektionale Lagen platziert, um die nötige Steifigkeit in der Hauptschwingungsrichtung zu erreichen. Teilweise wurden viskoelastische Zwischenlagen (VE), hergestellt aus thermoplastischem Elastomer (TPE) mit einer Dicke von 0,2 mm eingebracht, um die Dämpfungscharakteristiken der Struktur zu erhöhen. Insgesamt wurden elf Varianten untersucht, die in Tabelle 13 zusammengestellt sind.

Tabelle 13: Material, Dicke und Lagenaufbau der untersuchten Varianten

Variante	Material	Dicke, t (mm)	Lagenaufbau
A	Stahl	1	Isotrop
B.1	CFK	2	$[0^\circ/90^\circ, 0_2^\circ, \pm 45^\circ, 0_2^\circ, 0^\circ/90^\circ]$
B.2		2,4	$[0^\circ/90^\circ, 0_3^\circ, \pm 45^\circ, 0_3^\circ, 0^\circ/90^\circ]$
B.3		2,8	$[0^\circ/90^\circ, 0_4^\circ, \pm 45^\circ, 0_4^\circ, 0^\circ/90^\circ]$
B.1.VE	CFK-TPE	2	$[0^\circ/90^\circ, VE, 0^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ, VE, 0^\circ/90^\circ]$
B.2.VE		2,4	$[0^\circ/90^\circ, VE, 0_2^\circ, \pm 45^\circ, 0_2^\circ, VE, 0^\circ/90^\circ]$
B.3.VE		2,8	$[0^\circ/90^\circ, VE, 0_3^\circ, \pm 45^\circ, 0_3^\circ, VE, 0^\circ/90^\circ]$
C.1	GFK	3,2	$[0^\circ/90^\circ, 0_5^\circ, \pm 45^\circ, 0_5^\circ, 0^\circ/90^\circ]$
C.2		3,6	$[0^\circ/90^\circ, 0_6^\circ, \pm 45^\circ, 0_6^\circ, 0^\circ/90^\circ]$
C.1.VE	GFK-TPE	3,2	$[0^\circ/90^\circ, VE, 0_4^\circ, \pm 45^\circ, 0_4^\circ, VE, 0^\circ/90^\circ]$
C.2.VE		3,6	$[0^\circ/90^\circ, VE, 0_5^\circ, \pm 45^\circ, 0_5^\circ, VE, 0^\circ/90^\circ]$

Eine parametrisch numerische Untersuchung, basierend auf der Verzerrungsenergiemethode eines skalierten und abstrahierten faserverstärkten Masts wurde durchgeführt, um eine optimierte Vorzugsvariante mit hohem modalen Dämpfungsverhalten auszuwählen. Mit dieser Methode wurden die modalen Dämpfungsparameter des Masts auf Grundlage der richtungsabhängigen Materialeigenschaften von klassischen uni- und bidirektionalen kohlefaser- oder glasfaserverstärkten Epoxidlagen berechnet.

Das Model wurde unter Verwendung der Software ABAQUS mit 3D-Elementen vernetzt und besteht insgesamt aus ca. 120.000 Knoten und einer daraus resultierenden Anzahl von 55.000 Elementen. Die Verbindung zwischen den Punktmassen und dem Mast wurde durch das Multi-Contact-Point-Coupling geschaffen. Durch die FEM wurde das strukturelle Schwingverhalten des Masts unter Einfluss von Lasten beschrieben, bewertet und optimiert. Die betrachteten Lasten wurden von praktischen Anwendungen abgeleitet. Die Berechnungen wurden sowohl für das klassische Material Stahl, als auch für die ausgewählten faserverstärkten Epoxidmaterialien durchgeführt. Die Simulation lieferte numerische Ergebnisse sowohl für lokale Spannungen der Komponenten als auch die strukturelle, dynamische Reaktion. Das Schwingverhalten des Systems wurde durch die Randbedingungen des Referenzmasts definiert und die Lasten durch Punktlasten eingeleitet. Die berechneten Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenformen wurden für die folgenden zwei Extremlastfälle entnommen.

- 1 Das Lastaufnahmemittel wurde auf der Oberseite des RBG positioniert, was den ungünstigsten Fall für die horizontale (in Fahrtrichtung) Schwingung darstellt. Die Anregung erfolgte durch Beschleunigen bzw. Abbremsen des gesamte RBG mit einem Wert von ungefähr  $50 \text{ mm/s}^2$ .
- 2 Das Lastaufnahmemittel wurde mittig positioniert, was den ungünstigsten Fall für die transversale Schwingung darstellt. Die Anregung erfolgte durch Beschleunigen bzw. Abbremsen des LAM inkl. der aufgenommenen Last mit einem Wert von ca.  $87 \text{ mm/s}^2$ .

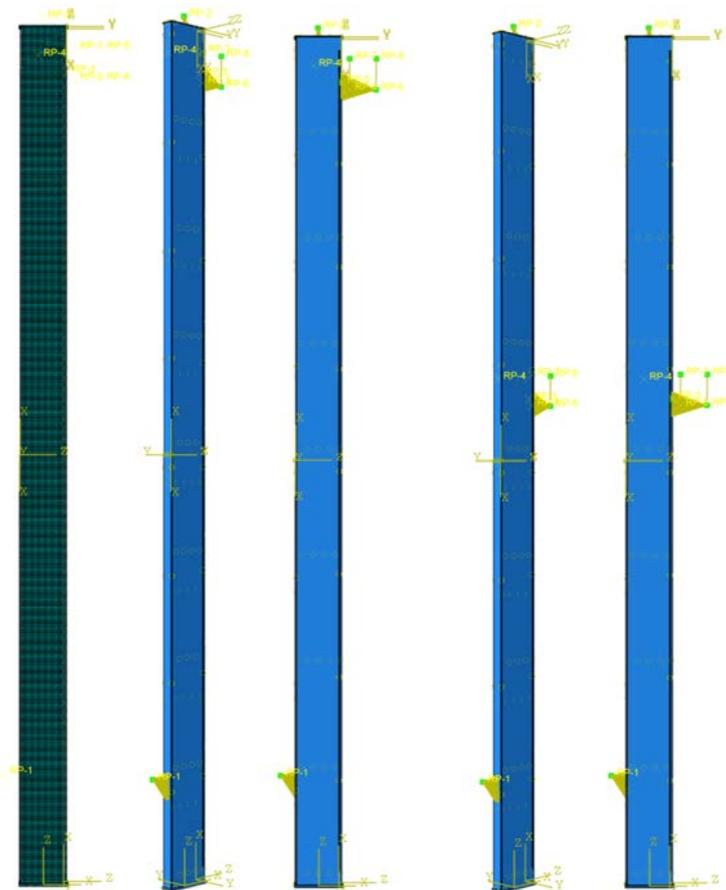


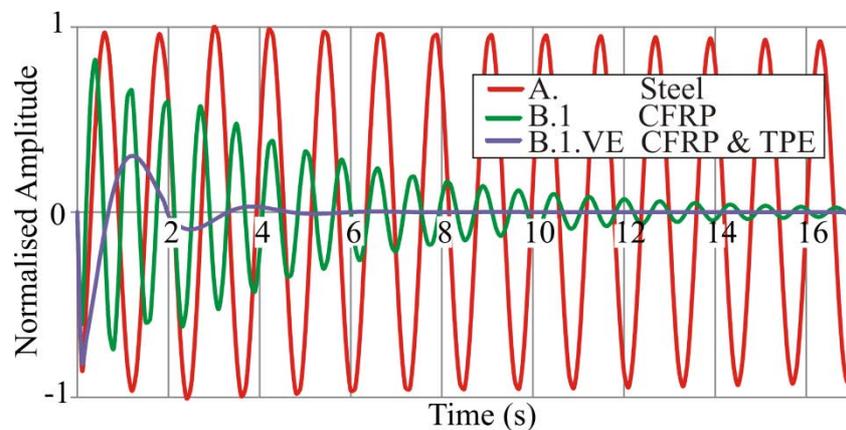
Abbildung 24: FE Modell des untersuchten Masts (links) mit den untersuchten Extremlastfällen (mitte, rechts)

Ein Ansatz, um die anisotropen Dämpfungseffekte im numerischen Modell zu berücksichtigen, ist die Anwendung der Verzerrungsenergiemethode. Die hier angewandten Dämpfungseigenschaften wurden durch eine spezielle Technik der Resonanzbiegung, welche an Verbundwerkstoffe in Kombination mit einer schnellen Fourier-Transformation (FFT) in Einklang mit der [DIN EN ISO 6271-3] angepasst wurde, ermittelt. Die Berechnung des modalen Verlustfaktors von anisotropen Verbundstrukturen durch die Nutzung eines Finite-Elemente-Modells wurde durch die Hinzunahme der Tensor Komponenten des m-ten finiten Elementes zur gesamten

Verzerrungsenergie erreicht. Infolgedessen konnte der modale Verlustfaktor jeder Eigenform aus den Komponenten der Materialdämpfungen und den separaten Beiträgen zur gesamten Verzerrungsenergie berechnet werden.

**Tabelle 14: Simulationsergebnisse der bestgeeigneten Varianten für die weitere Auswahl einer Vorzugsvariante, normiert auf die Referenzvariante A (\*Die maximale Amplitude dieser Varianten lagen bereits unter der Grenze von 20 %)**

Extrem- lastfall	Variante	A	B.1	B.2	B.3	B.1.V E	B.2.V E	B.3.V E	C.2	C.2.V E
	Masse	1	0,39	0,47	0,54	0,37	0,45	0,52	0,84	0,80
1	1. EF	1	1,04	1,15	1,24	0,89	1,03	1,13	0,69	0,72
	Dämpfung	1	32	32	33	140	120	96	114	111
	Abklingzeit	1	2,6E-2	2,4 E-2	1,7 E-2	2,1 E-2	5,7 E-2	7,6 E-2	1,1 E-2	1,1 E-2
2	1. EF	1	1,13	1,22	1,29	0,97	1,10	1,19	0,72	0,75
	Dämpfung	1	32	33	33	139	121	99	114	110
	Abklingzeit	1	2,3E-3	1,4E-3	5,0E-4	0,0*	0,0*	0,0*	0,0*	0,0*



**Abbildung 25: Darstellung von drei Beispielen des ersten Extremlastfalles und die dazugehörigen Abklingprozesse**

Die Ergebnisse der untersuchten Varianten wurden normiert und mit der Referenzvariante aus Stahl (Variante A) verglichen, siehe hierzu Tabelle 14. Die Masse, die erste Eigenfrequenz (1. EF), das modale Dämpfungsverhältnis (Dämpfung) und die Abklingzeit werden als relative Werte zur Variante A dargestellt. Um vergleichbare Ergebnisse zu schaffen und die Anzahl der möglichen Parameter zu minimieren, wurde eine dynamische Randbedingung festgelegt: Eine zulässige Variante soll mindestens die gleiche dynamische Steifheit in Anregungsrichtung wie Variante A und somit gleiche oder höhere Werte der Eigenfrequenzen besitzen.

Jede Variante war signifikant leichter und lieferte hohe Dämpfungsverhältnisse. Trotzdem erfüllten nur die Varianten B.1, B.2, B.3, B.2.VE und B.3.VE die dynamische Randbedingung. Die modalen Dämpfungsverhältnisse der CFK- und GFK-Varianten waren im untersuchten Frequenzbereich um ca. zwei Größenordnungen größer als die Dämpfung der Stahl-Referenzvariante. Sie sind am Beispiel des ersten Lastfalles und der ersten Eigenfrequenz in Abbildung 25 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die GFK-Varianten ein besseres Dämpfungsverhalten als die CFK-

Varianten haben. Indes ist auch zu beobachten, dass aufgrund der geringen Steifigkeiten die initialen Amplituden höher ausfallen als die der CFK-Varianten und somit zu einem Nichterfüllen der dynamischen Randbedingung führen. Wie erwartet, war das modale Dämpfungsverhalten der Stahlstruktur aufgrund der vorgegebenen Materialsymmetrie bei allen Frequenzen identisch. Die CFK-Varianten erreichen die gleiche Steifigkeit bei einer deutlich reduzierten Masse und einer signifikanten Erhöhung der Dämpfung, was diese Werkstoffgruppe als Vorzugsvariante qualifiziert.

## 1.6 Demonstratormasten

Zur Konzipierung und Fertigung des Demonstratormasts in konventioneller Stahlbauweise wurde der in Abschnitt 1.2 erstellte abstrahierte Mast mit Faktor 1/10 skaliert, um einen Demonstratormast von ca. 3 m Länge zu erhalten. Das Schwingungsverhalten wurde mittels Modalanalyse abgeglichen. Es entstand eine Schweißkonstruktion mit Blechstärken von 1 bis 3 mm. Anschließend wurde die Konstruktion den fertigungstechnischen Erfordernissen angepasst und es wurden vier verschiedene Varianten gefertigt.

Damit das Schwingungsverhalten auch beim Demonstratormast mit dem Referenzsystem übereinstimmt, wurde die Konstruktion in mehreren Iterationsschritten angepasst. Bei der Skalierung sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Dichte und E-Modul können nicht skaliert werden
- der Skalierungsfaktor für Punktmassen und äußere Kräfte beträgt 1/1000
- da die Dichte und E-Modul nicht skaliert werden, liegen die Eigenfrequenzen um den Faktor 10 höher als beim nicht skalierten Referenz-Mast
- die Verformungen liegen um den Faktor 100 niedriger als beim Referenz-Mast

Abbildung 26 stellt die Konstruktion des Demonstratormasts in Stahlbauweise dar. Insgesamt wurden vier Stahlmasten gefertigt (siehe Anlage C):

- lasergeschweißt, an die Einspannplatte
  - geschraubt
  - geschweißt
- punktgeschweißt, an die Einspannplatte
  - geschraubt
  - geschweißt



**Abbildung 26: Demonstratormast in Stahlbauweise**

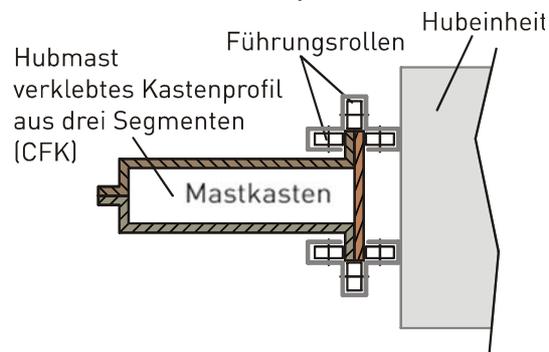
Bei der Konzipierung der Demonstratormasten in Faserverbundbauweise stand der Nachweis der Erhöhung des Dämpfungsverhaltens im Vordergrund. Die Verbesserung des Dämpfungsverhaltens konnte durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen realisiert werden. Gleichzeitig entspricht der Bauraum dem des Demonstratormasts in Stahlbauweise.

**Tabelle 15: Lagenaufbauten der Demonstratormasten**

Lagen-Nr.	Orientierung	Dicke	Lagen-Nr.	Orientierung	Dicke
1	0°/90° Gew.	0,6	1	0°/90° Gew.	0,6
2	0° UD	0,3	2	0° UD	0,3
3	0° UD	0,3	3	VE	0,2
4	+/- 45° Gew	0,6	4	0° UD	0,3
5	0° UD	0,3	5	+/- 45° Gew	0,6
6	0° UD	0,3	6	0° UD	0,3
7	0°/90° Gew.	0,6	7	VE	0,2
			8	0° UD	0,3
			9	0°/90° Gew.	0,6

Es wurden zwei Vorzugsvarianten erarbeitet, die beide höhere Dämpfungseigenschaften und geringere Massen als die Stahlmasten bieten. Variante 1 ist mit einem reinem CFK-Laminataufbau gefertigt. Die Variante 2 wurde um zwei Lagen thermoplastisches Elastomer (TPE) ergänzt und soll den experimentellen Vergleich des Einflusses von TPE-Zwischenschichten ermöglichen. Die Lagenaufbauten sind in Tabelle 15 dargestellt.

Für eine effiziente Fertigung in kleineren Stückzahlen und unter Berücksichtigung der Bauteilgröße wurde für die Fertigung ein Prepreg-Out-of-Autoklav-Fertigungsprozess festgelegt. Grundlage dafür ist ein Prepreg-CFK-Material, welches unter Temperatur und ohne zusätzlichen Druck – nur unter Vakuum – optimal und blasenfrei aushärtet. Das gewählte Prepreg-Material aus einer Standard-Kohlenstofffaser und einer Epoxidharz-Matrix (EP) wird auch für Eisenbahnanwendungen eingesetzt und ist somit auch für den Einsatz bei größeren Bauteilabmessungen erprobt und bietet zusätzlich auch brandhemmende Eigenschaften. Als TPE-Material wird eine TPU-Folie verwendet, welche im Fertigungsprozess als zusätzliche Schicht mit eingelegt wird und sich beim Aushärten gut mit der EP-Matrix verbindet. Der Aushärtezyklus für das Prepregsystem erfolgt über 3 Temperaturstufen (30 °C, 90 °C, 105 °C) bei einer Gesamtdauer von 800 Minuten, wobei die Temperzeit enthalten ist.



**Abbildung 27: Vorzugsvariante aus CFK mit in die Hauptstruktur integrierten Führungsschienen**

Gefertigt wird das CFK-Kastenprofil aus 3 verklebten Segmenten, wie in Abbildung 27 dargestellt. Diese Segmente werden in eigens für das Bauteil gefertigte, einseitige Werkzeugformen gelegt. Dabei wird sichergestellt, dass die Formen die geforderte Temperaturstabilität während des Aushärteprozesses aufweisen und eine gute Oberflächenqualität des Masts gewährleisten. Das Werkzeug ist ein für diesen Prozess übliches einseitiges Werkzeug und ermöglicht die Realisierung einer Bauteilaußen-seite mit hoher Oberflächengüte.



Abbildung 28: Ablauf der Fertigung des CFK-Demonstratormasts

In Abbildung 28 sind die Einzelschritte der Fertigung eines CFK-Demonstratormasts dargestellt. Dabei wird nach der Werkzeugvorbereitung das Laminat mit den Einzelschichten nach dem Ablageplan aufgebaut und dabei zwischenverdichtet. Mit dem vakuumdichten Konsolidierungsaufbau erfolgt die Laminatkonsolidierung unter Vakuum und Temperatur. Im Anschluss an die Entformung erfolgen das Besäumen und der Zuschnitt der drei Einzelsegmente, da diese zusammenhängend in einer Werkzeugform gefertigt werden. Abschließend werden die Segmente in einer Positioniervorrichtung verklebt und mit dem Flansch-Klebzapfen komplettiert. Der Klebzapfen wurde über die spannungsangepasste Gestaltung des Querschnitts im Klebbereich für möglichst geringe Werkstoffanstregungen bei Belastung optimiert. Dieser komplette Fertigungsprozess ist auch auf ein Bauteil in der Dimension eines RBG-Originalmasts übertragbar.

## 1.7 Untersuchungen an Demonstratormasten

### Messungen an den Demonstratormasten

Die Messungen am Versuchsstand (siehe Anlage D) mit den Demonstratormasten erfolgten in zwei Stufen. Zuerst wurden die Masten in einer experimentellen Modalanalyse untersucht. Anschließend erfolgten die Messungen des Ausschwingvorgangs mit einer gezielten Kräfteerregung.

#### Experimentelle Modalanalyse (EMA)

Die EMA dient zur Ermittlung der Modalparameter – Eigenfrequenzen, Eigenmoden und modale Dämpfungen. Dabei werden die Demonstratormasten gezielt zum Schwingen angeregt und deren Ausschwingverhalten gemessen. Es ergibt sich so ein Signal, aus dem mittels fast Fourier Transformation das Verhältnis aus Anregung

zur Antwort im Frequenzspektrum ermittelt werden kann, die sogenannte Übertragungsfunktion FRF (frequency response function). Durch diese können Amplitudenüberhöhungen bei bestimmten Anregungsfrequenzen und der dazugehörige Phasengang, und so die Lage und Ausprägung der Eigenschwingformen, bestimmt werden. Die Ergebnisse können zur Ermittlung von kritischen Betriebsfrequenzen und Betriebsformen herangezogen werden.

Die Demonstratormasten waren bei den Messungen auf eine Einspannplatte angeschraubt bzw. angeschweißt, die auf dem Aufspannfeld der Versuchshalle fest verschraubt wurde. In Abbildung 29 ist der prinzipielle Versuchsaufbau der EMA dargestellt. Mittels Impulshammer wurde jeder Mast an 20 markierten Punkten angeregt. Diese decken sich mit in der FEM ermittelten Messpunkten, um einen Vergleich der Ergebnisse mithilfe des Modal Assurance Criterion (MAC) zu ermöglichen. Das Antwortsignal lieferte ein Beschleunigungsaufnehmer, der an der Mastspitze platziert wurde. Dabei musste die Ausrichtung der Raumachsen entsprechend dem im Messprogramm definierten Koordinatensystem erfolgen. Zur Vereinfachung sind die Achsen dafür in Form eines kartesischen Koordinatensystems auf einer der Sensorflächen eingraviert.

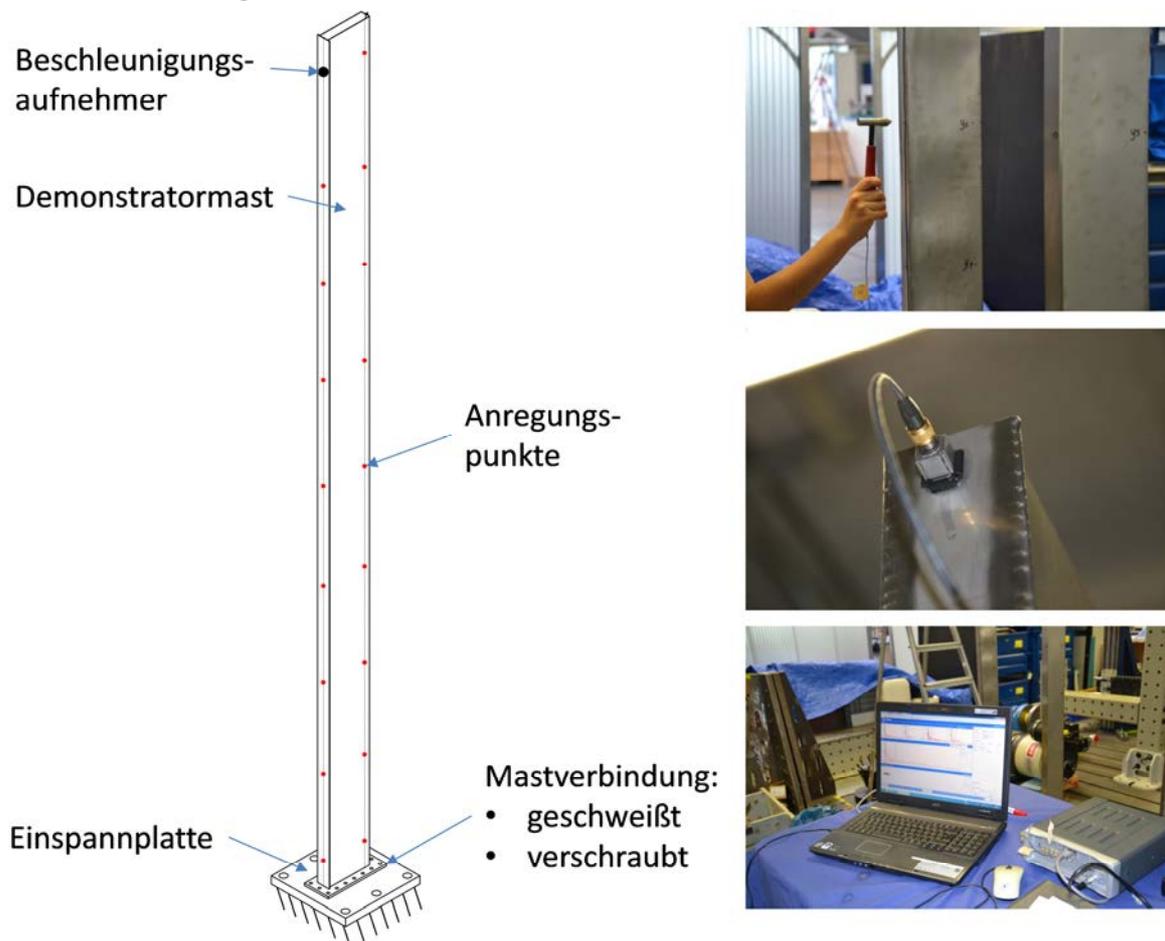


Abbildung 29: Versuchsaufbau experimentelle Modalanalyse

In Tabelle 16 sind die untersuchten Demonstratormasten aufgelistet. Die Bezeichnung TPU weist dabei auf eine 0,2 mm dünne TPU-Folie hin, die im Fertigungsprozess eingebracht wurde. Diese entkoppelt die Lagen und führt dadurch zu einer erhöhten Dämpfung.

**Tabelle 16: Untersuchte Demonstratormasten und Einspannungen**

Variante	Konstruktion	Einspannung (Einspannplatte)
Stahl 01	lasergeschweißt	angeschraubt
Stahl 02	punktgeschweißt	angeschraubt
Stahl 03	lasergeschweißt	angeschweißt
Stahl 04	punktgeschweißt	angeschweißt
CFK 01	verklebt	verschraubt
CFK 02	verklebt	verschraubt
CFK/TPU 01	verklebt, mit Dämpfungsschicht	verschraubt
CFK/TPU 02	verklebt, mit Dämpfungsschicht	verschraubt

#### *Online Messung des Abklingverhaltens*

Zum Vergleich der CFK- und Stahlmasten wurden diese gemeinsam auf eine Grundplatte aufgeschraubt und mit Elektromagneten in Schwingung versetzt. Die Masten waren dazu im Grundzustand jeweils an einen Magnet gekoppelt, der über einen Rahmen mit dem Fundament verbunden wurde. Am Mast selbst befand sich dazu ein 2 kg schwerer Stahlblock, der als Anker diente. Auf diesen wurde ein Beschleunigungssensor geklebt, der per Funksignal online Messdaten an ein Messsystem sendete. Getriggert wurde jede Messung durch das Abkoppeln der Magneten vom Ankerblock.

Für die Erfassung der Messdaten wurde eine am ILK entwickelte mobile Messplattform genutzt. Im Lastenheft der Plattform standen die Punkte: mobil, klein, leicht und simpel, sowie schnell zu bedienen. Um diese Punkte zu erfüllen, wurde auf ein Arduino Board zurückgegriffen, welches über ein Bluetooth Low Energy (BLE) Protokoll schnurlos programmiert werden und Daten übertragen kann (siehe Abbildung 30). Für maximale Mobilität bezieht die Plattform ihre Energie aus einem Li-Ion Akku. Die Akkulaufzeit ist abhängig von der gewählten Messaufgabe, maximal sind Laufzeiten bis zu 20 Stunden möglich. Die Messung wird über angeschlossene „Mess-Satelliten“ realisiert. Dieses Prinzip erlaubt eine maximale Flexibilität des gesamten Systems, da vielschichtige Messaufgaben (z. B. Dehnungsmessung, Beschleunigungsmessung, Kraftmessung, Temperaturmessung, Druckmessung, Lichtmessung und Signalisierung) gelöst werden können.

Die Hardware wird über das Arduino IDE programmiert. Dies hat den Vorteil, dass auf viele bereits vorgeschriebene Programmteile zurückgegriffen werden kann. Analoge Messwerte können mit bis zu 10 kHz erfasst und übertragen werden. Die Auswertung der Daten wird über MatLab-Simulink realisiert. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, bis zu 10000 Messwerte im internen Speicher zu loggen. Alle aufgezeichneten Werte stehen für eine weitere Datenverarbeitung zur Verfügung.

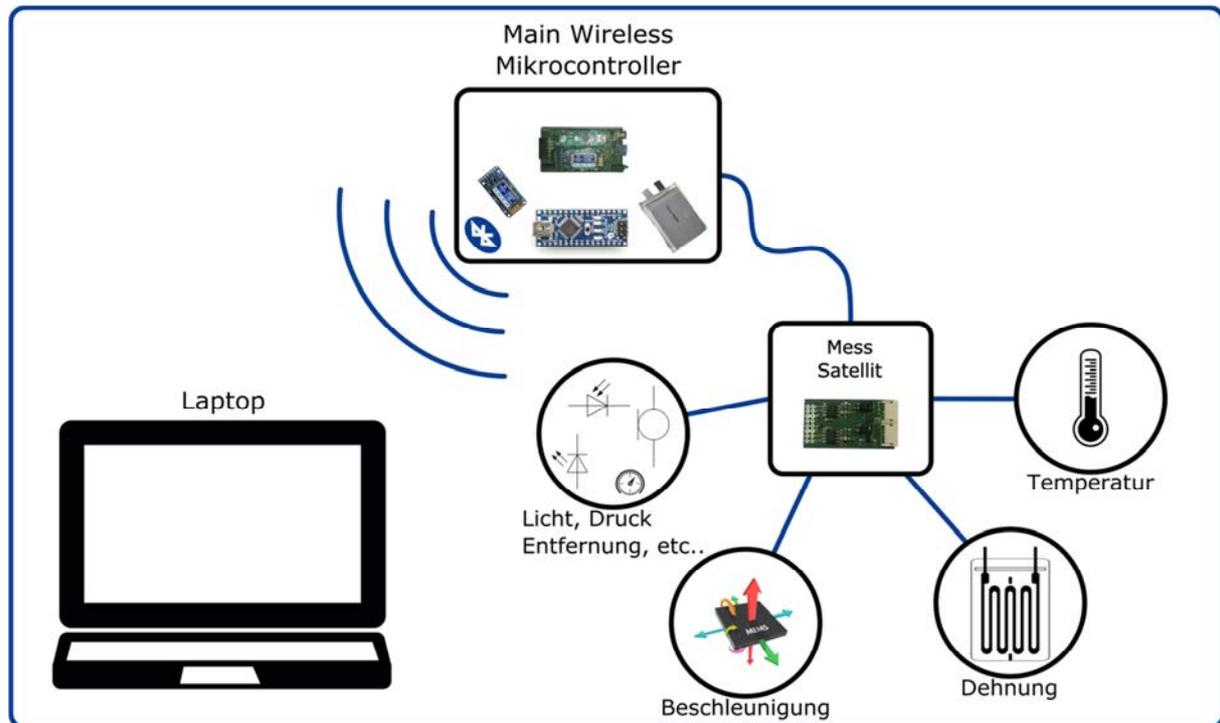


Abbildung 30: Mobile Messplattform für die Schwingungsmessung der Masten

### Auswertung der Messungen und Verifikation der Modelle

Die Modelle der FEM wurden anhand der erzielten Messergebnisse überprüft. Zur statistischen Absicherung der Ergebnislage wurde jede Messung fünf Mal wiederholt. Die Güte wurde durch die Kohärenz bzw. Deckung der Frequenzspektren ermittelt und zur Überprüfung programmtechnisch visuell dargestellt. Zudem erlaubte die Software das manuelle Löschen und Wiederholen einer Messung, um eine unzureichende Kohärenz zu verbessern. Die Messdaten wurden grafisch gegenübergestellt, was eine erste Abschätzung der Eigenfrequenzen ermöglichte. Durch eine Extremwertauswahl konnten diese in den Datensätzen quantifiziert und nachfolgend zum Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse genutzt werden. Hierfür wurden die zu den Frequenzen gehörenden Eigenschwingformen mittels MAC gegenübergestellt und deren Abweichung bestimmt. Die Ergebnisse der EMA sind exemplarisch für den Demonstratormast Stahl 01 in Tabelle 17 und die Demonstratormasten CFK/TPU und CFK in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 17: EMA Ergebnisse Demonstratormast Stahl 01

Stahl 01						
	Messung 1	Messung 2	Differenz Eigenfrequenz			
Mode Nr.	Eigenfrequenz (Hz)	Eigenfrequenz (Hz)	absolut (Hz)	relativ (%)	Dämpfung (%)	MAC (%)
1	4,2	4,2	0,0	0,0	1,3	47,4
2	18,1	18,2	0,1	0,0	0,5	99,0
3	24,9	25,0	0,1	0,0	0,2	98,6

Tabelle 18: EMA Ergebnisse Demonstratormast CFK/TPU und CFK

Mode Nr.	Eigenfrequenz (Hz)				Dämpfung (%)			MAC (%)
	CFK/TPU	CFK	Differenz		CFK/TPU	CFK	Differenz (%)	
			absolut (Hz)	relativ (%)				
1	4,9	5,5	0,6	11,0	0,4	0,3	0,6	99,0
2	17,2	22,0	5,0	22,0	1,1	0,2	4,0	93,0
3	29,5	33,7	4,0	12,0	1,1	0,3	3,5	92,0

In den Messungen zum Abklingverhalten zeigte sich die Steigerung der Dämpfung in den FKV-Masten, was sich in Form einer deutlichen Differenz im Abklingen der Amplituden darstellte (siehe Abbildung 31).

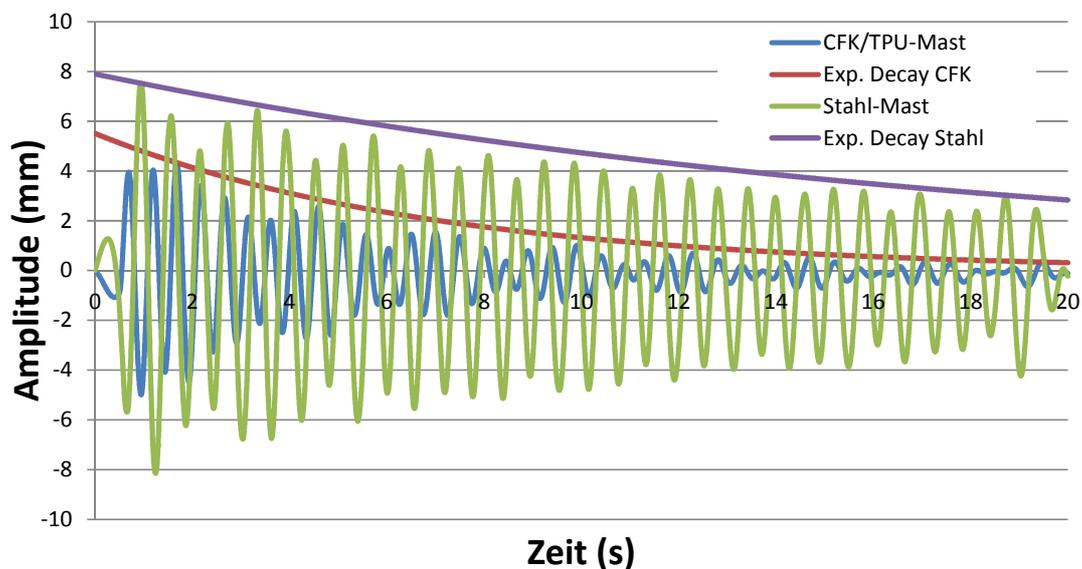


Abbildung 31: Abklingverhalten von Stahl- und CFK/TPU-Masten

Die Versuche wurden wiederum mit einem Stahlmast und zwei FKV-Masten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 19; Vergleichsbasis ist wieder der Stahl-Demonstratormast.

### Bewertung der Potentiale von RBG-Hubmasten in FVW-Bauweise

Die Messungen haben gezeigt, dass der Einsatz von FKV-Hubmasten bei RBG sinnvoll ist. Es ließ sich eine deutliche Gewichtsreduktion von rund 43 % bei gleichbleibender Steifigkeit erzielen. Dabei ist zu erwähnen, dass es sich um eine modale Steifigkeit handelt und hierfür die Differenz zwischen den Frequenzen der verschiedenen Masten herangezogen wurde. Auch konnte die modale Dämpfung deutlich gesteigert werden, wobei diese von der betreffenden Frequenz und der betreffenden Mastvariante abhängig ist. So ließ sich eine minimale Steigerung von 170 % für die einfache FKV-Variante und bis zu 800 % für die Variante mit zusätzlicher Dämpfungsschicht aus 0,2 mm starker TPU-Folie feststellen. Dies spiegelte sich auch im Lehrschen Dämpfungsmaß (auch logarithmisches Dekrement) wider, einem Maß für die Abklingzeit eines Ausschwingvorgangs. Aus dem Schwingungsverlauf konnte für das Lehrsche Dämpfungsmaß ein deutlicher Unterschied vom Faktor 4 gemessen werden. Diese derart hohe Dämpfung ermöglicht den Wegfall zusätzlicher Regeleinheiten zur aktiven Dämpfung, wodurch Energie, Material und somit Kosten gesenkt werden können.

Tabelle 19: Vergleich der Ergebnisse zwischen Stahl-, CFK- und CFK/TPU-Demonstratormast

		Stahl	CFK	CFK/TPU
<b>Masse [kg]</b>		12,0	6,8	6,8
<b>Steifigkeit [Hz]</b>	<b>1. Eigenfrequenz</b>	4,1	5,5	4,9
	<b>2. Eigenfrequenz</b>	18,4	22,0	17,2
	<b>3. Eigenfrequenz</b>	25,2	33,7	29,5
<b>Dämpfung [%]</b>		0,13 ± 0,07	0,35 ± 0,23	1,24 ± 0,66

## 1.8 Aufbereitung der Forschungsergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Forschungsergebnisse zusammengefasst und allgemeingültige Empfehlungen für die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen in Hubmasten von RBG gegeben.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Funktionswerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten untersucht. Zur Erreichung des Ziels wurde eine abstrahierte Mastkonstruktion aus dem gewählten Referenz Paletten-RBG abgeleitet. Unter Berücksichtigung der konstruktiven und simulativen Ergebnisse wurden skalierte Demonstratormasten sowohl aus dem Referenzmaterial Stahl als auch aus der favorisierten Faserverbundkonstruktion hergestellt. Es erfolgte die Validierung der Finiten-Elemente-Modelle anhand der in experimentellen Analysen ermittelten Modalparameter. Unter Berücksichtigung der definierten Lastannahmen, die auch für die Finite-Elemente-Analyse herangezogen wurden, wurden die Demonstratormasten am dafür konstru-

ierten und gebauten Prüfstand in Ausschwingversuchen miteinander verglichen. Bei der statischen Querbelastrung (quer zur Gasse) betrug die seitliche Auslenkung am Mastkopf beim CFK-Mast nur 60 % der Auslenkung des Stahlmasts. Im Ausschwingversuch quer zur Gasse konnte beim CFK-Mast eine 4fach höhere Dämpfung gemessen werden. Zusätzlich konnte beim CFK-Mast eine Masseeinsparung von 43 % gegenüber dem Stahlmast erreicht werden.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen den gewählten methodischen Ansatz. Somit kann dieser bei der Auslegung von schwingungsarmen CFK-Hubmasten verwendet werden. Insgesamt lassen sich mit den im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnissen folgende Vor- und Nachteile des Einsatzes von Faserverbunden in Hubmasten von RBG nachweisen:

#### *Vorteile*

- Reduzierung der Abklingzeit um bis zu 400 % beim Positionieren in relevanten Lastfällen durch signifikante Erhöhung der Werkstoffdämpfung
- Verzicht auf eine kostenintensive aktive Schwingungskompensation durch wirtschaftliche passive, d. h. materialeitige Dämpfung
- enorme Masseeinsparung beim Hubmast bis zu 43 % und daraus resultierendes Potential für Energieeinsparung
- Reduktion der Anzahl der Systemkomponenten durch Funktionsintegration

#### *Nachteile*

- komplexe und meist iterative Auslegung des Masts, die ein hohes Maß an Know-how erfordert
- ca. 10fach höhere Material- und Herstellungskosten gegenüber Stahlbauweise

Allgemein sind bei der Gestaltung und Dimensionierung sowie für den Betrieb von Hubmasten in Faserverbundbauweise folgende Arbeitsschritte notwendig bzw. Grundsätze zu beachten:

#### **Gestaltung und Dimensionierung**

- Definition von Lasten und Einsatzbedingungen
  - Lastannahmen nach [DIN 15350/92] für statischen und dynamischen Nachweis der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der CFK-Mastmasse
  - Spielzeitanalyse nach [FEM 9.851/03] für konkrete Lagerabmessungen
  - Definition von Lastkollektiven
  - Festlegen der Temperaturreichweitenbedingungen
- Beschreibung des Schwingungsverhaltens
- Erfassung der kritischen Schwingungskomponenten in zwei Richtungen, in der Gassenrichtung und quer zur Gasse im Rahmen einer umfassenden Systemanalyse

- Bestimmung der Systemanforderungen und Analyse des notwendigen Bau-  
raums
- Formulierung der Ziele zur Entwicklung der benötigten Lösungen, insbesondere  
zur
  - Dämpfung
  - Steifigkeit
  - Masse
- Konzeption, Berechnung und Auslegung der Mast-Struktur hinsichtlich der oben  
formulierten Ziele und die darauffolgende Schnittstellenanalyse mit dem System
  - gegebenenfalls Dämpfungsmaßnahmen, wie das Einbringen von Dämp-  
fungsschichten
  - gezielte Variation der Faserorientierung und der Faserarchitektur
  - Berücksichtigung der Fertigungsaspekte
  - statischer und dynamischer Nachweis der Mastkonstruktion mittels FEM
- Anpassung weiterer RBG-Komponenten an aktuelle Masse und Steifigkeit der  
Masten, d. h. Prüfen und ggf. Umsetzen der Möglichkeiten für
  - Funktionsintegration
  - Downsizing

### **Betrieb**

- Anpassung der Fahr- und Hubkurven an das Schwingungsverhalten des RBG  
mit CFK-Masten bei der Inbetriebnahme
- Berücksichtigung des Lagerklimas
  - Möglichkeiten zur Wärmeabfuhr aus der Dämpfungsenergie des Masten
  - Einsatz im Tiefkühlager nur bei entsprechender Berücksichtigung der  
Temperaturrandbedingungen entsprechend der Auslegung von CFK-  
Masten
- Wartung und Inspektion
  - CFK-Mast muss in regelmäßigen Abständen auf sichtbare Schäden (z. B.  
Risse, Verformungen, Delamination, abrasiver Verschleiß) kontrolliert  
werden
  - Führungsschienen, Mastfuß und Schnittstellen zu weiteren, am Mast an-  
gebrachten Komponenten unterliegen besonderer Aufmerksamkeit bei  
der Sichtkontrolle
  - bei Mastkollisionen
    - RBG-Betrieb sofort einstellen
    - Begutachtung der Kollisionsbereiche durch qualifiziertes Service-  
personal
    - im Schadenfall Masthersteller mit Maßnahmen zur Instandsetzung  
beauftragen

---

Eine alternative Lösung für die Umsetzung der Forschungsergebnisse bietet die hybride Mastkonstruktion. Bei dieser können schwingungskritische Stahlmastsegmente – besonders im oberen Mastbereich – durch hochdämpfende und leichte CFK-Module substituiert werden, um das Schwingungsverhalten zu optimieren.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die faser- bzw. textilverstärkten Kunststoffe sich hervorragend für die gezielte Dämpfung der Strukturschwingungen in RBG eignen. Im Rahmen des Projektes konnte aufgezeigt werden, dass das Potential zur Erhöhung der Dämpfung mittels Bauweisen aus faserverstärkten Kunststoffen groß ist und in Hubmasten von RBG zur passiven Schwingungsdämpfung eingesetzt werden kann. Der Durchsatz der RBG lässt sich so steigern, was zu effizienteren Lager-systemen führt.

Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen konventionellem Stahlbausystem und neuartigen Faserverbundbauweisen zu realisieren, wurde der RBG-Mast im Rahmen des Projekts stark abstrahiert. Das Konzept des Faserverbundmasts berücksichtigt den zur Verfügung stehenden Bauraum mit allen Restriktionen, wie geometrische Abmessungen und Anbindungsstellen. Für die Verbindung von Traverse und Mast wurden Anbindungskonzepte erarbeitet und dargestellt. Weiterführende Entwicklungen für Faserverbundbauweisen im Bereich der RBG sind für größere gefasste Systemgrenzen vorstellbar und können noch größere Potenziale dieser Bauweisen aufzeigen.

Die vergleichenden experimentellen Untersuchung zum Schwingungsverhalten an den entwickelten Demonstratormasten bestätigen die berechneten und simulierten Ergebnisse. Es zeigt sich das große Dämpfungsvermögen der Faserverbundstrukturen gegenüber der Stahlbauweisen an sehr einfach gestalteten Bauweisen. So könnte z. B. die Anzahl notwendiger Schottbleche zur Reduzierung von Schwingungen minimiert werden, wodurch Materialeinsatz und auch der Fertigungsaufwand sinken.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

## 2 Verwendung der Zuwendung

Im Berichtszeitraum fielen Personalkosten sowie Kosten für Gerätebeschaffung an. Je Forschungsstelle bearbeitete ein wissenschaftlicher Mitarbeiter das Projekt. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter sind dem Einzelansatz A. 1 des Finanzierungsplans zuzuordnen (siehe Tabelle 20 und Tabelle 21). Die Beschaffung der Lagervorrichtung für Versuchsstand / Demonstrator ist dem Einzelansatz B des Finanzierungsplans zuzuordnen.

**Tabelle 20: Angaben zum Personaleinsatz (TLA)**

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Mannmonate Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b>
AP 1 Systematisierung von Regalbediengeräten und Auswahl eines Referenzsystems	3
AP 2 Analyse des Referenzsystems	4
AP 3 Konzeption und Konstruktion alternativer Leichtbauweisen	0,5
AP 4 Kennwerteermittlung	0,5
AP 5 Simulation	4
AP 6 Demonstratormasten	2
AP 7 Untersuchungen an Demonstratormasten	8
AP 8 Aufbereitung der Forschungsergebnisse	2
<b>Summe:</b>	<b>24</b>

**Tabelle 21: Angaben zum Personaleinsatz (ILK)**

<b>Arbeitspaket</b>	<b>Mannmonate Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b>
AP 3 Konzeption und Konstruktion alternativer Leichtbauweisen	4
AP 4 Kennwertermittlung	3
AP 5 Simulation	6
AP 6 Demonstratormasten	5
AP 7 Untersuchungen an Demonstratormasten	4
AP 8 Aufbereitung der Forschungsergebnisse	2
<b>Summe:</b>	<b>24</b>

### 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Faserverbundwerkstoffe (FVW) eignen sich als Werkstoff für Hubmasten von RBG insbesondere aufgrund der geringen Dichte, der hohen Festigkeit, der hohen spezifischen Steifigkeit und des einstellbaren Energieabsorptionsvermögens. Diese Kennwerte hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Deshalb reicht es nicht aus, den herkömmlichen Werkstoff Stahl einfach durch einen FVW zu substituieren. Da FVW aus einer Kunststoffmatrix bestehen, in die Verstärkungsfasern eingebracht werden, müssen sowohl ein geeignetes Verstärkungsmaterial als auch die richtige Kunststoffmatrix verwendet werden. Die Anzahl der möglichen Kombinationen der resultierenden Verbundwerkstoffe ist sehr groß und eröffnet einen großen Parameterraum. Außerdem können die Verstärkungsfasern mittels verschiedener textiler Bindungsarten verbunden sein, unterschiedliche Durchmesser haben oder auf unterschiedliche Art und Weise in die Matrix eingelegt werden. Auf die Kennwerte der FVW hat die Gestaltung des Verbunds der Verstärkungsfasern einen entscheidenden Einfluss. Zudem wird das Ergebnis von den Prozessparametern der Fertigung (Temperatur, Druck, Dauer) beeinflusst. Daher ist der Einsatz von FVW für Hubmasten von RBG nur mit den Erkenntnissen zu verwirklichen, die als Ergebnis von umfangreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens gewonnen werden konnten.

### 4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Folgende Transfermaßnahmen wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:

#### **Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses**

Die erste Sitzung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde am 28.05.2015 am TLA durchgeführt. In der Besprechung stellten die Forschungsstellen das Vorhaben vor. Außerdem wurden potenzielle Referenzsysteme vorgestellt und diskutiert. Im Ergebnis wurde das Referenzsystem ausgewählt.

Die zweite Sitzung mit dem projektbegleitenden Ausschuss fand am 17.09.2015 am ILK statt. In der Sitzung wurden die Zwischenergebnisse präsentiert und über weitere Arbeitsschritte diskutiert.

Die dritte Sitzung mit dem projektbegleitenden Ausschuss fand am 21.01.2016 am ILK statt. In der Sitzung wurden die Zwischenergebnisse präsentiert und die weiteren Arbeitsschritte diskutiert.

Die Abschlussitzung fand am 25.10.2016 am ILK statt. In der Besprechung stellten die Forschungsstellen die Projektergebnisse vor. Die Praxisrelevanz der erzielten

Ergebnisse stand im Zentrum der anschließenden Diskussion. Es wurden die Potenziale der faserverstärkten Funktionswerkstoffen an den Demonstratormasten vorgeführt.

### **Tagungen**

Am 30.09.2015 wurde das Forschungsvorhaben in Form eines Vortrags auf dem 10. Fachkolloquium der WGTL (Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik) in Duisburg mit dem Titel „Einsatz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe zur Schwingungsdämpfung bei Hubmasten von Regalbediengeräten“ vorgestellt. Der wissenschaftliche Artikel zum Vortrag wurde im Tagungsband (ISBN 978-3-941702-47-9) veröffentlicht [Zha/16].

Vom 10. bis 14.07.2016 wurde das Forschungsvorhaben in Form eines Vortrags am 23. International Congress on Sound & Vibration in Athen mit dem Titel „Design of a highly damped fibre-reinforced lightweight mast for automated storage systems in logistics“ vorgestellt. Der wissenschaftliche Artikel zum Vortrag wurde im Tagungsband veröffentlicht [Fil/16a].

### **Fachzeitschriften**

Das Forschungsvorhaben wurde in der Fachzeitschrift Carbon Composites Ausgabe 3 / 2016 mit dem Titel „VON 0 BIS UNTERS DACH. Schneller und ruhiger zum Ziel – Leichtbau in der Logistik“ veröffentlicht [Fil/16b].

### **Akademische Lehre**

Für einen Transfer in die akademische Lehre wurden Themenstellungen für Beleg- und Diplom- bzw. Masterarbeiten erstellt. Eine Belegarbeit wird 2017 erfolgreich abgeschlossen. Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Lehre ein.

Weiterhin sind folgende fortführende Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach dem Abschluss des Forschungsvorhabens geplant:

- Vorstellung der Forschungsergebnisse auf der 25. Internationalen Kranfachtagung im März 2017
- Vorstellung der Forschungsergebnisse auf dem 10. Fachkolloquium der WGTL im Herbst 2017
- Vorstellung der Forschungsergebnisse auf dem Innovationstag Mittelstand des BMWi am 18. Mai 2017 in Berlin

Zur Übersicht sind im Plan für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft in der Anlage A die bereits durchgeführten Maßnahmen grün markiert.

## Quellen

- [Ach/03] **Achternbosch, M.; Bräutigam, K. -R.; Kupsch, C.; Reißer, B.; Sardemann, G.:** *Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkompontenten.* Wissenschaftliches Bericht: FZKA 6879. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. 2003
- [Arn/09] **Arnold, D.; Furmans K.:** *Materialfluss in Logistiksystemen.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- [Ber/13] **Berndt, K.:** *Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung.* 10. Auflage, Springer-Verlag. 2013
- [DIN 15350/92] **DIN 15 350:** *Regalbediengeräte; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnungen.* 1992
- [DIN EN 363/16] **DIN EN 363:** *Persönliche Absturzschutzausrüstung - Persönliche Absturzschutzsysteme.* 2008
- [DIN EN 528/09] **DIN EN 528:** *Regalbediengeräte – Sicherheitsanforderungen,* 2009
- [DIN EN 795/12] **DIN EN 795:** *Persönliche Absturzschutzausrüstung - Anschlagleinrichtungen.* 2012
- [DIN EN 60204/09] **DIN EN 60204-32:** *VDE 0113-32: Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstungen von Maschinen ,Teil 32 Anforderungen für Hebezeuge.* 2009
- [DIN EN 61000/11] **DIN EN 61000-6-2:** *VDE 0839-6-2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 6-2: Fachgrundnormen - Störfestigkeit für Industriebereiche (IEC 77/488/CDV:2015); Deutsche Fassung FprEN 61000-6-2.* 2011
- [FEM 9. 851/03] **FEM 9. 851:** *Leistungsnachweis für Regalbediengeräte; Spielzeiten.* 2003
- [Fil/16a] **Filippatos, A.; Dannemann, M.; Wohlfahrt, D.; Modler, N.; Schmidt, T.:** *Design of a highly damped fibre-reinforced light-weight mast for automated storage systems in logistics.* In: Konstantinos Vogiatzis (Hg.): 23rd International Congress on Sound and Vibration. Athens, 10-14 July. International Institute of Acoustics and Vibration, S. 1–8.
- [Fil/16b] **Filippatos, A.:** *VON 0 BIS UNTERS DACH. Schneller und ruhiger zum Ziel – Leichtbau in der Logistik.* Augsburg. Carbon Composites Magazin. 2016

- 
- [Gud/10] **Gudehus, T.:** *Logistik Grundlagen – Strategie – Anwendungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [Hom/07] **Hompel, M; Schmidt, T; Nagel, L.:** *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*, Springer-Verlag 2007
- [Jah/12] **Jahn, B.; Karl, D.; Witten, E.:** *Composites-Marktbericht 2012: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe AVK und Carbon Composites e. V. CCeV 2012.
- [Nac/06] **Nackendorst, U.; Beuermann, S.; Spiess, H.; Löhnert, S.:** *Technische Mechanik kompakt: Starrkörperstatik, Elasto-statik, Kinetik*. Springer-Verlag 2006
- [Per/09] **Perneder, R.:** *Handbuch Zahnriementechnik. Grundlagen, Berechnung, Anwendung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- [URL1] <http://www.beewen.de/pdf/Miniload-Overview-D-0306.pdf>, Stand: 05.01.2015
- [URL2] <http://www.elastollan.basf.us/pdf/1185A.pdf>, Stand: 17.05.2016
- [Wol/05] **Wolf, T.:** *Kosten-Wirksamkeits-Analyse und Nutzwertanalyse. Wirtschaftlichkeit von öffentlichen Investitionen*, GRIN Verlag 2005
- [Zha/16] **Zhakov, A.; Schmidt, T.; Dannemann, M.; Modler, N.:** *Ein-satz faser- bzw. textilverstärkter Verbundwerkstoffe*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2016.

# Anlagenverzeichnis

- A Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft
- B Definition Punktmassen Finite-Elemente-Simulation
- C Fertigungszeichnung Demonstratormast aus Stahl
- D Zusammenbauzeichnung Versuchsstand / Demonstrator

## A Ergebnistransfer in die Wirtschaft

spezifische Maßnahme	Art des Transfers	Ziel / Beschreibung	Datum/ Zeitraum während der Bewilligung	Datum/ Zeitraum nach der Bewilligung
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erste Sitzung des PA als „Kick-Off“ zur Festlegung der ersten Schritte und Abstimmung zu den vorhabenbezogenen Aufwendungen der Wirtschaft (vAW)</li> <li>- regelmäßiger, ausführlicher und fortlaufender Ergebnistransfer in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit unter Einbeziehung der Forschungsvereinigung (FV)</li> <li>- regelmäßige Berichte über den jeweils aktuellen Arbeitsstand, Vergleich mit dem Arbeitsplan, Diskussionen über weiteres Vorgehen</li> <li>- Abschlussbesprechung zum Schlussbericht</li> </ul>	unmittelbar zu Beginn der Arbeiten Anfang des 3., 5. und 8. Quartals des Bewilligungszeitraums	Anfang 1. Quartal nach Abschluss
Gezielte Ansprache potentiell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Präsentation der Ergebnisse auf öffentlichen Tagungen / Veranstaltungen der FV</li> <li>b) individuelle Ansprache von Unternehmen zum gegenseitigen Kenntnistransfer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- weitere Verbreitung der Technologie in der Wirtschaft, besonders der Intralogistik</li> <li>- Einbindung interessierter Unternehmen, FV und ggf. Verbände (z. B. VDI)</li> <li>- direkter Transfer in die Industrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Haupt- und Schlussphase</li> <li>b) nach Bedarf im gesamten Zeitraum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) ca. ½ Jahr nach Abschluss</li> <li>b) fortlaufend</li> </ul>
Publikationen der Projektergebnisse im Internet	Einstellen von Zusammenfassungen / abstracts auf den Hompages der FV und der Forschungsstellen (Fstn)	Zugriff auf die inhaltliche Themenstellung und die Ergebnisse für interessierte Unternehmen ermöglichen	Haupt- und Schlussphase	im 1. Jahr nach Abschluss
wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften o. ä. / Dissertationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, z. B. Hebezeuge und Fördermittel, F+H Fördern und Heben, Logistik für Unternehmen</li> <li>b) Studien-, Diplomarbeiten und ggf. eine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen</li> <li>b) Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) in der Schlussphase</li> <li>b) mit Beginn des Vorhabens</li> </ul>	im 1. Jahr nach Abschluss

# Anlage A

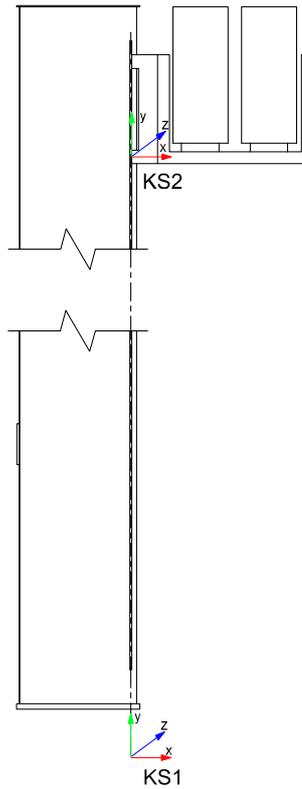
	Dissertation			
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	a) Vertrieb über VDMA-Verlag o. ä. b) Herausgabe auf individuelle Anfrage	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen	auf Anfrage in der Schlussphase	fortlaufend
Vorstellung der Ergebnisse / Vorträge und Präsentationen	Vorträge im Rahmen - des Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) inklusive eines Artikels im Tagungsband - der Internationalen Kranfachtagung inklusive eines Artikels im Tagungsband - Tagungen / Versammlungen der FV und Fstn	- nationaler und internationaler Ergebnistransfer - Information der Mitglieder der FV sowie interessierter Fachleute	in der Haupt- und Schlussphase	im 1. Jahr nach Abschluss
Vorstellung in anderen Fach- und Branchenverbänden	VDI-Seminare im Fachbereich Produktion und Logistik des Dresdner Bezirksvereins	nationaler Ergebnistransfer	eine Veranstaltung im 5. Quartal	eine Veranstaltung im 1. Halbjahr nach Abschluss
Beratung von Unternehmen	Beratung von Unternehmen innerhalb und außerhalb des PA	Beratung zur Projektierung, zur Fertigung und zum Einsatz von faser- bzw. textilverstärkter Funktionswerkstoffe bei Hubmasten von Regalbediengeräten	im gesamten Zeitraum 4. Quartal	fortlaufend
Einbeziehung von Multiplikatoren	Forschungsprogramme - „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) - Verbundprojektförderung auf dem Gebiet der Zukunftstechnologien im Freistaat Sachsen	Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Know-how-Transfer, Stärkung des Forschungsstandortes Deutschland, speziell Sachsen	fortlaufend	fortlaufend
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	- Lehrveranstaltungen und Forschungsseminare (z. B. Technische Logistik) an den Fstn - Einbindung von studentischen Hilfskräften	Verbreitung neuer Technologien in die Wirtschaft durch Hochschulabsolventen	ab 1. Quartal	fortlaufend
Umbau der Versuchseinrichtung zum Demonstrator	Präsentation der Ergebnisse zu Demonstrationszwecken für interessierte poten-	auf die Praxis bezogene Verdeutlichung des Leichtbaupotentials und des Nutzens der	letztes Quartal	Anfang 1. Quartal nach Abschluss

## Anlage A

---

	tielle Nutzer	Forschungsergebnisse in der Versuchshalle des TLA		
Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter	Zusammenfassung und Veröffentlichung der Ergebnisse in VDI-Arbeitsblättern	Verbreitung der Ergebnisse bei Ingenieuren aus allen Branchen		im 1. Jahr nach Abschluss

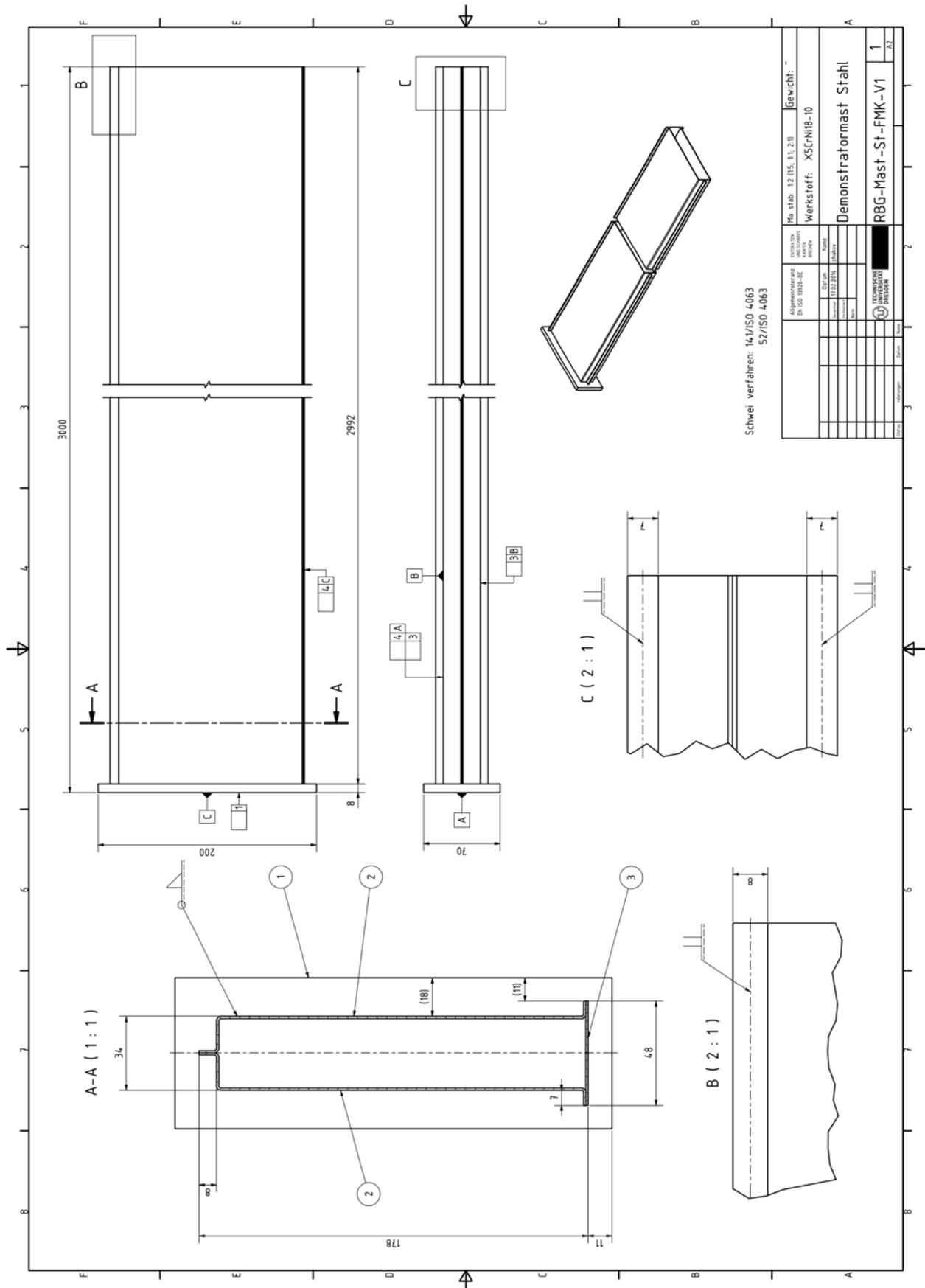
## B Definition Punktmassen FE-Simulation



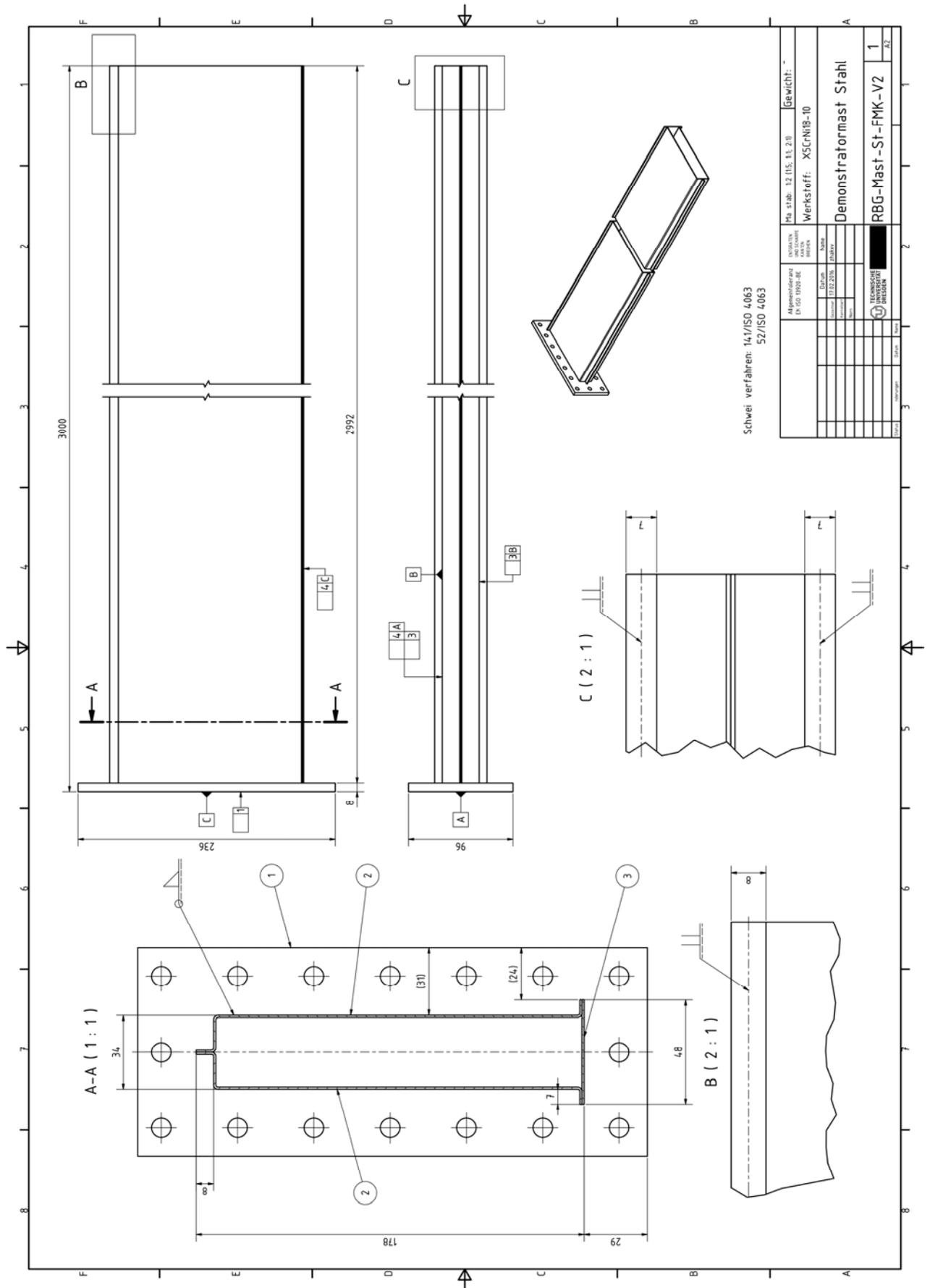
### Definition der Punktmassen am Referenz RBG

Objektname	Schaltschrank/ Hubwerk	Kopfträger	Hubwagen	Kabine	Teleskop1	Teleskop2	Last1	Last2
Koordinatensystem	KS1			KS2				
X-Koordinate [mm]	-2200	-788	730	-210	1000	2000	1015	2015
Y-Koordinate [mm]	4130	32460	254	1000	0	0	1173	1173
Z-Koordinate [mm]	200	0	100	645	200	200	200	200
Masse [kg]	2100	50	1150	100	325	325	1000	1000

# C Demonstratormast aus Stahl



# Anlage C



# D Versuchsstand / Demonstrator

