

Leichtbau bei Unstetigförderern durch Einsatz moderner Werkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Dipl.-Ing. Peter Linsel

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)

Abstract: Unstetigförderer unterliegen zahlreichen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, weshalb eine Reduktion der bewegten Masse hilft, Energie einzusparen. Eine solche Massenreduktion ist durch Einsatz neuartiger Werkstoffe möglich. Am Beispiel des Mastes eines Regalbediengerätes (RBG) wird aufgezeigt, dass durch Einsatz moderner Werkstoffe und der sogenannten Sandwichbauweise im Vergleich zu einem Stahlmast bis zu 70 % der Masse eingespart werden kann.

1 Ausgangssituation

Die typische Arbeitsweise von Unstetigförderern und deren Last bewegenden Komponenten (wie z. B. Krane mit Kranbrücke, Laufkatze und Kranhaken; Gabelstapler mit Hubgerüst, Gabelträger und Lastgabeln; Regalbediengeräte (RBG) mit Hubwagen und Lastaufnahmemittel (LAM)) ist geprägt von einem ständigen Wechsel der Bewegungsrichtung und damit von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen und oft unerwünschten dynamischen Kräften (z. B. Kippen von Gabelstaplern in Längsrichtung, schwingungsinduzierte Kräfte bei RBG-Lastaufnahmemitteln). Bewegungszeitanteile mit konstanter Geschwindigkeit sind typischerweise nahezu vernachlässigbar. [Gro07]

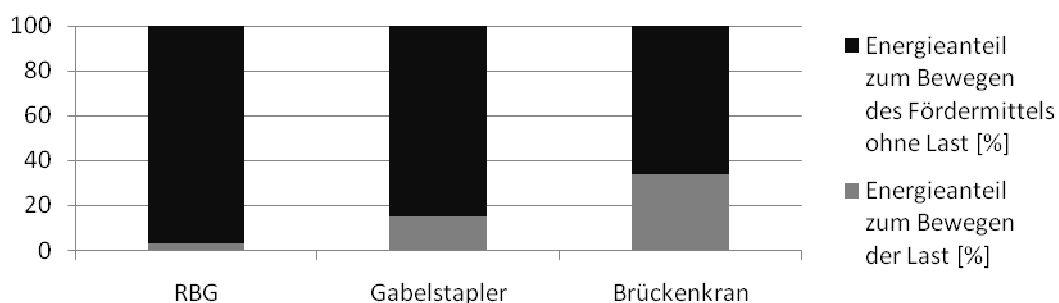


Abbildung 1: Energieverbrauchsanteile zum Bewegen eines Unstetigförderers bzw. dessen Last Quelle: RBG: viastore systems GmbH, Modell viaspeed 18 Meter; Gabelstapler: Jungheinrich AG, Modell ETX 515; Brückenkran: Conecranes GmbH, Ausführung mit Tragfähigkeit von 5000kg)

Hinzu kommt das bei Unstetigförderern stets ungünstige Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewicht. Dadurch ist der Energieanteil, der für das Beschleunigen des Förderers bzw. seiner Komponenten samt Nutzlast aufgewendet werden muss, wesentlich größer als der allein für das Beschleunigen der Last notwendige Teil. Bei der Verzögerung lässt sich nur ein geringer Anteil der eingesetzten Energie zurückgewinnen [Sch10]. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Verteilung des Energieverbrauchs zum Bewegen der Last und zum Bewegen des Fördermittels

ohne Last. Dabei ist zu erkennen, dass der Energieanteil zum Bewegen der Last zum Teil nur einen verschwindend kleinen Wert gegenüber dem Energieanteil zum Bewegen des Fördermittels ohne Last hat (z. B. RBG). Dieser bauartbedingte Nachteil lässt sich nicht beseitigen. Umso wichtiger ist es daher, durch konsequenten Leichtbau den für die Bewegung des Fördermittels erforderlichen Energieanteil drastisch zu reduzieren, was aufgrund der in den vergangenen Jahren stark gestiegenen Energiekosten enorm an Bedeutung gewonnen hat.

2 Arten des Leichtbaus

Im Bereich des Leichtbaus werden nach [Kle09] und [Wie07] 5 verschiedene Arten unterschieden:

- **Differentialbauweise**
Hierbei werden Einzelteile punktuell verbunden. Beispielsweise werden im Blechleichtbau Bauteile durch Nieten, Schweißen oder Kleben miteinander verbunden. Diese Bauweise lässt ein späteres Trennen (Recycling oder partielle Reparatur) zu.
- **Integralbauweise**
Bei der Integralbauweise wird eine Minimierung des Werkstoffs der strukturbildenden Einzelteile angestrebt. Weiter ist, im Gegensatz zur Differentialbauweise, das Bauteil aus einem Stück gefertigt, ohne verbindende Maßnahmen. Folglich wird der Materialeinsatz auf ein Minimum reduziert. Demgegenüber steht der Nachteil der in der Regel höheren Werkstoff- und Werkzeugkosten.
- **Integrierende Bauweise**
Die integrierende Bauweise ist im Ansatz eine Kombination aus Differential- und Integralbauweise. Dabei wird für einzelne Sektionen die Integralbauweise angewendet und diese Bauteile werden über z.B. Nieten oder Kleben verbunden.
- **Verbundbauweise**
Die Verbundbauweise kombiniert verschiedene Materialien, um die einzelnen positiven Eigenschaften dieser nutzen zu können. Hier sei z.B. faserverstärkte Kunststoffe genannt.
- **Vollwand- und Schalensysteme**
Dieses Leichtbauprinzip ist hauptsächlich für große Strukturen (z.B. Aufbauten von Nutzfahrzeugen) geeignet. Das Grundprinzip liegt in der Aufgabenteilung zwischen Tragen und Verkleiden.

Der Ansatz, welcher am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie am Beispiel des Regalbediengerätes verfolgt wird, ist ein kombinierter Ansatz. Durch die Verbundbauweise soll erreicht werden, dass durch Einsatz bzw. Kombination verschiedener Materialien deren positiven spezifischen Eigenschaften optimal genutzt werden. Ziel hierbei ist es, die Belastungen betriebsgerecht aushalten zu können und dabei das Optimum an Gewicht zu sparen. Da ein Regalbediengerät in seiner Grundstruktur mehrere Funktionen (Fahren in Gassenrichtung, Anheben des Hubwagens, Ein- bzw.

Auslagern von Waren in ein Regalfach) ausführen muss und folglich dadurch verschiedenen Belastungen ausgesetzt ist, müssen hier verschiedene Grundstrukturen und Materialkombinationen für jeden einzelnen Fall angewendet werden. Folglich ist hier ein Ansatz der Differentialbauweise zu finden, da die einzelnen Bauteile miteinander verbunden werden müssen. Die Verbundbauweise wird jedoch auch mit der Integralbauweise kombiniert, da die Bauteile, die die einzelnen Funktionen ausführen müssen, in ihrer Struktur hin optimiert werden sollen, um eine optimale Gewichtsersparnis zu erreichen.

Schichtenverbund und Laminattheorie

Laminare sind Verbunde von mehreren, miteinander verklebten Einzelschichten gleicher oder verschiedener Materialien. Sie werden häufig eingesetzt, um einzelne Schichten unidirektional verstärkter Kunststoffe miteinander zu verbinden. Sind die Fasern in den einzelnen Schichten unterschiedlich orientiert, so ist das Laminat in mehreren Richtungen verstärkt und kann bei entsprechendem Aufbau auch quasi-isotropes Verhalten annehmen. Auch Sandwichprofile können als Laminat aufgefasst und mit der Schichtentheorie nach [Alt04] behandelt werden.

In der Schichtentheorie wird zuerst das Verhalten der einzelnen Schichten betrachtet, um dann unter Berücksichtigung der Reihenfolge und Dicke der Schichten Aussagen über das Verhalten des Laminats zu treffen. Grundlage hierfür ist das Dehnungsverhalten unter Spannung der einzelnen Schichten. Dazu führt man für jede Schicht ein lokales Koordinatensystem x_1', x_2', x_3' ein, in dem x_1' parallel zur Faserrichtung orientiert ist. Nach [Alt04] ergibt sich dann die symmetrische Steifigkeitsmatrix, welche die Dehnungen mit den Spannungen in einer Schicht über die Gleichung verknüpft. Für eine detaillierte Betrachtung empfiehlt sich [Alt04] und [Ber92].

3 Aufbau eines Mastes aus Sandwichprofilen

3.1 Werkstoffauswahl

Hautwerkstoff

Die Haut des Sandwichprofils soll die schwingenden Lasten aufnehmen, weshalb an sie höchste Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Schwingfestigkeit gestellt werden. Da nur ein kleiner Volumenanteil des Mastes aus dem Hautwerkstoff besteht, ist eine Rezyklierbarkeit nachrangig, während z.B. eine thermische Verwertung akzeptabel ist.

Nach Abwägung der Eigenschaften einzelner Faserwerkstoffe, fällt die Wahl für den Hautwerkstoff auf ein durch C-Fasern verstärktes Epoxidharz. Aramidfasern sind für den Einsatz am Mast eines RBG ungeeignet, da sie druckempfindlich sind, der Mast jedoch auf Druck beansprucht wird. Dieses Problem könnte man beheben, indem man die Fasern bei der Laminatherstellung vorspannt, was jedoch einen erhöhten

Fertigungsaufwand zur Folge hätte und bei der Biegung des Mastes auf der Zugseite zu noch höheren Belastungen führt. Von der Verwendung von Glasfasern wird ebenfalls abgesehen, da sie auf wechselnde Beanspruchung empfindlich reagieren, was angesichts der zahlreichen Beschleunigungsvorgänge des RBGs und der daraus resultierenden Schwingungen des Mastes ungünstig ist. [Ber92]

Kohlenstofffasern (C-Fasern) hingegen sind hervorragend geeignet, da sie druckunempfindlich und dauerhaft sind. Aus mechanischer Sicht qualifiziert sie besonders ihre hohe Steifigkeit, denn nach [Alt04] sinkt die Spannung im Sandwichkern mit Erhöhung der Steifigkeit der Hautschicht, weshalb die Verwendung von C-Fasern den Einsatz eines niederfesten und somit leichteren Kernwerkstoffes erlaubt. Als Matrix für die C-Fasern wird Epoxidharz ausgewählt, da es durch seine hervorragenden dynamischen Eigenschaften für die beim Betrieb des RBG auftretenden Lasten gut geeignet ist. Als duromerer Werkstoff ist eine stoffliche Verwertung nach [Ber92] im Gegensatz zur thermischen Verwertung nicht möglich.

Kernwerkstoff

Aufgabe des Kernwerkstoffes ist es, einen Abstand zwischen den Hautschichten herzustellen und sie zu stützen. Aus diesem Grund werden keine hohen Festigkeitsanforderungen an den Kern gestellt, während er hingegen eine geringe Dichte aufweisen soll, um Gewicht zu sparen. Im Hinblick auf die möglichen stoßartigen Belastungen wird eine Bruchdehnung von $\varepsilon_B \geq 10\%$ gefordert, so dass kein Sprödbruch auftritt. Um den Einsatz des RBGs in Kühllagern zu ermöglichen, soll der Werkstoff bei -30 °C einsetzbar sein und auch in feuchter Umgebung keine Feuchtigkeit absorbieren. Ferner ist aus Gründen des Umweltschutzes eine Rezyklierbarkeit wünschenswert.

Aus der mechanischen Belastung lässt sich ein unter Leichtbaugesichtspunkten besonders gut geeigneter Werkstoff identifizieren. Ziel ist es, die Mastmasse m_M

$$m_M = m_H + h_k + b + h_1 + \rho_k$$

zu minimieren, die aus der Masse der Hautschichten (m_H) sowie der des Kernes besteht. Da die Wahl für den Hautwerkstoff im vorherigen Abschnitt bereits getroffen worden ist, lässt sich der Betrag des ersten Summanden nicht mehr beeinflussen, während im zweiten Summanden die Breite (b) und die Höhe (h_1) des RBGs vorgegeben sind.

Unter der Betrachtung des Schubspannungsverlaufes wurde unter der Annahme dünner und steifer Häute die Gleichung $\tau_k \approx \frac{Q}{b \cdot d}$ hergeleitet, in der im Folgenden $d \approx h_k$ angenommen wird.

Die zu ertragende Querkraft ist am Mastfuß maximal und setzt sich dort aus der Summe der vom Kernwerkstoff unabhängigen Kräfte Q_0 der Querkraft, die durch die

Beschleunigung der Mastmasse entsteht, zusammen. Stellt man die obige Gleichung nach h_k um, ergibt sich die Gleichung

$$h_k = \frac{Q_0}{(b \cdot \tau) - (S_w \cdot \ddot{x} \cdot h_1 \cdot b \cdot \rho_k)}$$

womit man für die Mastmasse

$$m_M = m_H + h_1 \cdot Q_0 \cdot \frac{\rho_k}{\tau - S_w \cdot \ddot{x} \cdot h_1 \cdot \rho_k}$$

erhält. Aus dieser Gleichung kann man erkennen, dass die Mastmasse minimal wird, wenn der Bruch minimal wird. Für die Identifizierung des optimalen Werkstoffes muss für τ im Nenner die maximal zulässige Spannung τ_{zul} eingesetzt werden. $\tau_{k,zul}$ kann durch einen geeigneten Werkstoffkennwert, der sich auf Zugspannungen bezieht, ersetzt werden, indem man eine dem fraglichen Werkstoff angemessene Vergleichsspannungshypothese anwendet.

Für duktile Werkstoffe empfiehlt [Gro05] die Anwendung der Hypothese der Gestaltänderungsenergie, die einen mehrachsigen Spannungszustand auf die Vergleichsspannung

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

abbildet.

Abbildung 2 zeigt ein Diagramm mit Werkstoffen, welche grundsätzlich als Kernwerkstoff in Frage kommen. Die Ordinate entspricht dem zu minimierenden Zähler aus der Gleichung für die Mastmasse, während die Abszisse den Nenner widerspiegelt. Ein optimaler Werkstoff befindet sich also in der rechten, unteren Ecke, während ein besonders schlechter Werkstoff links oben zu finden wäre. Im Diagramm sind mehrere Leitlinien mit der Steigung 1 eingezeichnet. Werkstoffe, die auf derselben Leitlinie liegen, sind für den Einsatz als Kernwerkstoff im Hinblick auf die Querkraft gleichwertig.

In der unteren, linken Ecke der Abbildung befindet sich ein Warnsymbol, mit dem die verwendete Werkstoffdatenbank CES Edupack 2010 davor warnt, dass der Nenner für einige Werkstoffe negativ wird, weshalb jene im Diagramm nicht eingezeichnet werden können. Bei diesen Werkstoffen handelt es sich um exotische Materialien wie z.B. Indium, deren Festigkeit so gering ist, dass der Mast aufgrund seiner eigenen Trägheit beim Pufferstoß brechen würde.

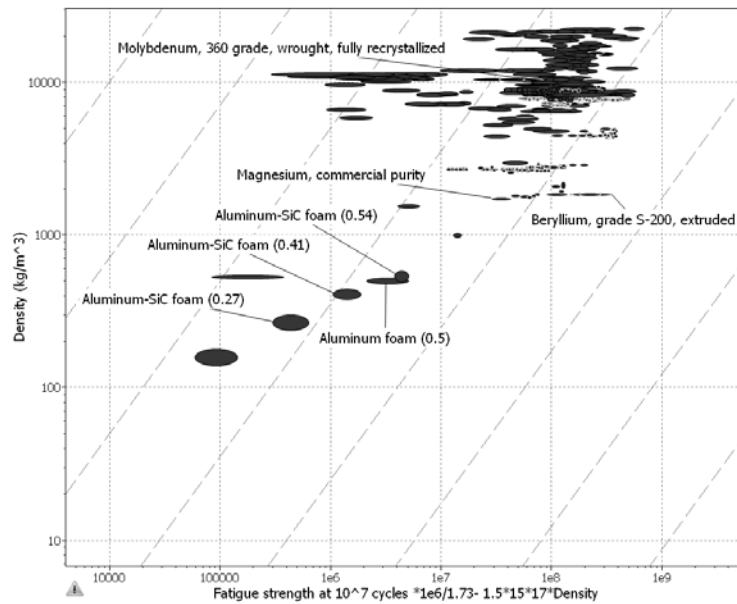


Abbildung 2: Werkstofflandkarte [Ces10]

Wie man aus dem Diagramm ablesen kann, ist Beryllium als Kernwerkstoff mechanisch hervorragend geeignet, doch ist es giftig, was hinsichtlich des Einsatzes des Mastes in menschlicher Nähe oder in Lebensmittellagern inakzeptabel ist. Gemäß dem Diagramm ist Magnesium als Kernwerkstoff ebenfalls gut geeignet, worauf verschiedene Aluminium- und Aluminium-SiC-Schäume folgen. Die auf der gleichen Leitlinie liegenden Werkstoffe hoher Dichte (z.B. Molybdän) werden nicht weiter betrachtet, da sie, wie später gezeigt werden wird, für den Leichtbau nicht geeignet sind.

3.2 Umsetzung

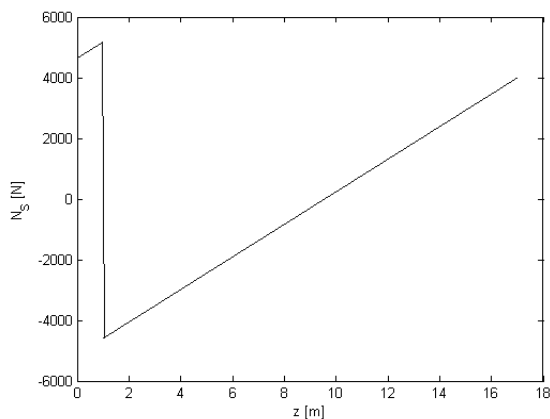
Mit den ausgewählten Werkstoffen werden in einem iterativen Prozess die jeweils zulässigen Mindestabmessungen ermittelt, die mit ausreichender Sicherheit ein Überschreiten der zulässigen mechanischen Spannungen verhindern. Um der schwingenden Beanspruchung des Mastes Rechnung zu tragen, wurde als Vergleichswert die Wechselfestigkeit nach 10^7 Lastspielen gewählt.

Da der Pufferstoß in beide Richtungen wirken kann, der Mast jedoch asymmetrisch belastet ist, muss die Dimensionierung gegen Bruch je einmal mit $\ddot{x} > 0$ und einmal mit $\ddot{x} < 0$ erfolgen.

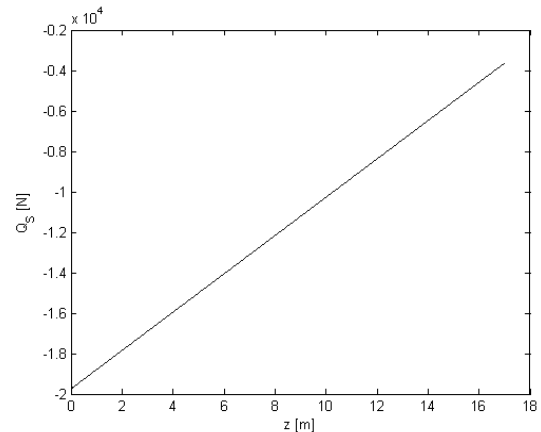
Analog zu einem herkömmlichen Stahlbalken ist es wünschenswert, das Sandwichprofil dick und schmal auszulegen. Dennoch wird hiervon Abstand genommen, da ein großes Verhältnis der Flächenträgheitsmomente um die verschiedenen Achsen zu unerwünschtem Biegedrillknicken (Kippen) führen kann. Um dieses Problem zu umgehen, werden in einem ersten Ansatz annähernd quadratische Profilquerschnitte verwendet.

Spannungsverlauf

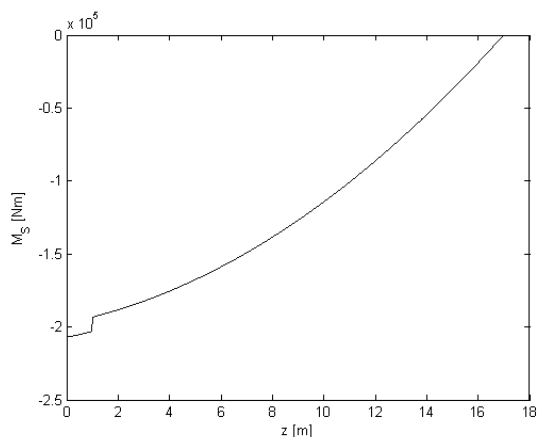
Nachfolgend wird der Festigkeitsnachweis für Aluminium SiC Foam (0.54), das als Kernwerkstoff die Konstruktion des leichtesten Mastes ermöglicht, detailliert besprochen. Die hier gezeigten Diagramme sehen für alle anderen in Frage kommenden Werkstoffe qualitativ gleich aus.



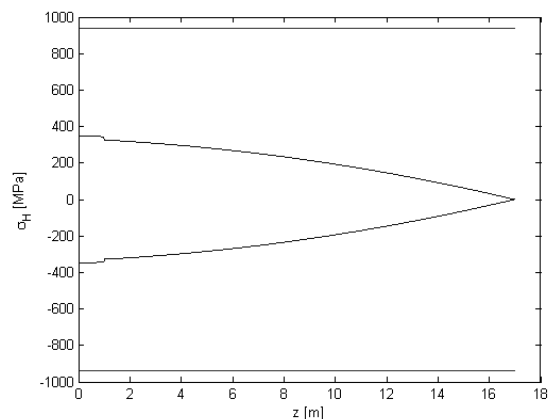
**Abbildung 3: Normalkraftverlauf
(Aluminium SiC Foam (0.54))**



**Abbildung 4: Querkraftverlauf
(Aluminium SiC Foam (0.54))**



**Abbildung 5: Momentenverlauf
(Aluminium SiC Foam (0.54))**



**Abbildung 6: Spannungsverlauf in der Haut
(Aluminium SiC Foam (0.54))**

Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen den Verlauf der Schnittkräfte und des Schnittmoments über der Höhe des Mastes, wenn für die Beschleunigung $\ddot{x} > 0$ gilt. Im anderen Fall würde man eine geringere Belastung des Mastes erhalten, weshalb dieser Lastfall nicht weiter betrachtet wird. Man erkennt, dass der Mastfuß die am höchsten belastete Stelle ist, weshalb sie intensiver betrachtet werden muss. Will man diesen Querschnitt genauer untersuchen, so muss man prüfen, ob die Haut oder der Kern versagenskritisch ist.

In Abbildung 6 begrenzen die horizontalen Linien die für die Haut zulässige Spannung im Zug- und Druckbereich. In der Haut herrscht aufgrund der Zug/Druck-Belastung eine homogene Spannung, welche von der inhomogenen Biegespannung überlagert wird, so dass auf der Außenseite der Haut die höchste Belastung herrscht.

Die wirkende Schubspannung wird in dieser Rechnung gemäß [Alt04] vernachlässigt. Im Diagramm sieht man, dass die tatsächliche Normalspannung mit $\sigma_{H,\max} = 351 \text{ MPa}$ nur 37 % der zulässigen Spannung erreicht, weshalb die Haut nicht versagenskritisch ist.

Die Biegespannungen im Kern sollten eigentlich vernachlässigbar sein, doch stellt sich heraus, dass dies nicht der Fall ist. Zwar ist die Biegespannung im Kern im Verhältnis zur Spannung in der Haut wirklich vernachlässigbar, doch ist die zulässige Spannung ebenfalls sehr viel kleiner, so dass man die Biegung bei der Auslegung des Sandwichkernes berücksichtigen muss. Dies gilt ebenso für die Spannungen aufgrund der Normalkräfte. Im Kern überlagert die homogene Spannung aufgrund von Zug/Druck die inhomogenen Schub- und Biegespannungen, weshalb die Vorhersage der höchstbelasteten Stelle innerhalb des Querschnittes einer eigenen Rechnung bedarf.

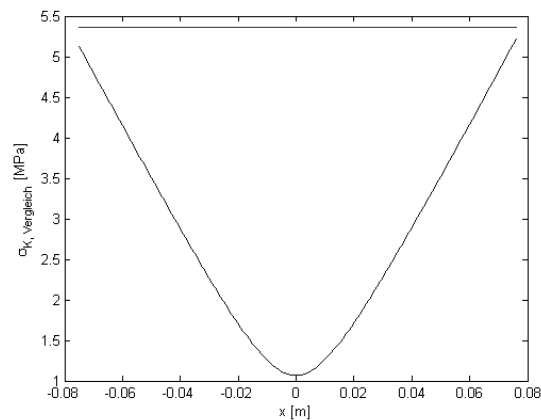


Abbildung 7: Vergleichsspannung im Kern am Mastfuß (Aluminium SiC Foam (0.54))

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Vergleichsspannung im Mastfußquerschnitt. Es ist zu erkennen, dass sich die am höchsten belastete Stelle bei $x = \frac{h_k}{2}$ befindet. Dort herrscht eine Spannung von $\sigma_{V,\max} = 5,2 \text{ MPa}$, was unterhalb der zulässigen Spannung von $\sigma_{K,\text{zul}} = 5,37 \text{ MPa}$ liegt.

Sicherheit gegen Instabilität

Beim Mast eines RBGs handelt es sich um ein schlankes, auf Druck beanspruchtes Bauteil, weshalb ein Nachweis der Sicherheit gegen Instabilität notwendig ist.

Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer FEM-Rechnung, die $\lambda = -20$ als betragsmäßig kleinsten Eigenwert ausgibt. Dies bedeutet, dass bei einer Umkehrung aller Lasten eine Sicherheit von 20 gegen Instabilität gegeben ist, was über der geforderten Sicherheit von 10 liegt.

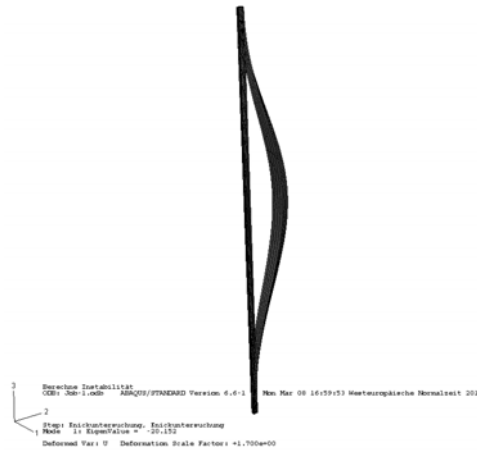


Abbildung 8: Instabilität (Aluminium SiC Foam (0.54))

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für eine grobe Wirtschaftlichkeitsabschätzung werden im Folgenden die Materialkosten eines Stahlmastes mit denen des Sandwichprofils verglichen.

Werkstoff	p [EUR/kg]	m[kg]	P[EUR]
Carbon Steel, AISI 1141, normalized	0,55	1.700	935
Aluminium SiC Foam (0.54)	7,13	262	1.868
Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, 0° lamina	33,7	204	6.875

Tabelle 1: Materialpreise [Ces10], [Ash05]

Tabelle 1 zeigt, dass ein Stahlmast Materialkosten von 935 EUR verursacht, während die Materialkosten des in dieser Arbeit konzipierten Mastes in Sandwichbauweise 8.743 EUR betragen. Die erhöhten Investitionskosten $\Delta P = 7.808$ EUR schlagen sich in reduzierten Betriebskosten nieder, da beim Beschleunigen des RBGs weniger Masse bewegt wird. Der Verbrauchspreis in einem eingeholten Angebot (Verbrauchspreis 16,12 Cent/MWh, Quelle: www.verivox.de) beträgt

$$p_{Strom} = 161,2 \frac{EUR}{MWh}$$

Wenn der Sandwichmast durch seine reduzierte Masse die Energie

$$\Delta E = \frac{\Delta P}{p_{Strom}}$$

im Betrieb einspart, lohnt sich bei einer Vernachlässigung der Finanzierungskosten die Anschaffung des leichten Mastes.

Die eingesparte Energie berechnet sich aus der Differenz der für n Beschleunigungsvorgänge benötigten elektrischen Energie zu

$$\Delta E = \frac{n \cdot v^2}{2 \cdot \eta_{Motor}} \cdot (m_{Stahl} \cdot m_{Sandwich}),$$

wenn man eine Energierückspeisung im Betrieb beim Abbremsen des RBGs ausschließt. Folglich lohnt es sich ab

$$n = \frac{2 \cdot \eta_{Motor} \cdot \Delta P}{v^2 \cdot (m_{Stahl} - m_{Sandwich}) \cdot p_{Strom}}$$

Beschleunigungsvorgängen, die erhöhten Investitionskosten in Kauf zu nehmen. Für den Motor wird ein Wirkungsgrad von $\eta_{Motor} = 0,8$ angenommen, was auf $n = 5,35 \cdot 10^6$ notwendige Beschleunigungsvorgänge führt.

Nimmt man an, dass bei einer Betriebszeit von täglich 12 Stunden bei 220 Arbeitstagen im Jahr der Mast alle 30 Sekunden einem Beschleunigungsvorgang unterliegt, so beträgt die Amortisationszeit $t = 16,9$ Jahre.

Da man über einen so langen Zeitraum die Finanzierungskosten nicht vernachlässigen darf, liegt die reale Amortisationszeit noch höher, weshalb es zurzeit dem RBG mit einem Mast in Sandwichbauweise in seiner Lebenszeit nicht gelingen wird, die erhöhten Investitionskosten zu rechtfertigen. [Fri10]

4 Ergebnisse und Ausblick

Wie gezeigt, kann man durch die Verwendung eines Sandwichprofils mit Deckschichten aus FVW eine Gewichtsreduktion von 72,5 % gegenüber einem Stahlmast erzielen. Eine weitere Einsparung von Masse ist mechanisch möglich. Über den Höhenverlauf eines Mastes wird der Werkstoff im unteren Bereich voll ausgenutzt, während seine Belastung zur Mastspitze hin rasch geringer wird. Man kann also im oberen Bereich einen Werkstoff geringerer Festigkeit und geringer Dichte, wie z.B. Aluminium SiC Foam (0.27), einsetzen. Eine Verringerung der Masse im oberen Mastteil hat zudem geringere Trägheitskräfte beim Pufferstoß zur Folge, weshalb der Bereich des Mastfußes entlastet wird, so dass auch dort Werkstoff eingespart werden kann.

Unbefriedigend ist die geringe Ausnutzung des FVW zu maximal 37 %. Es besteht die Möglichkeit, die Hautschichten dünner auszulegen oder die Höhe des Sandwichkerns zu reduzieren, um die Spannung in der Hautschicht zu steigern, doch führen beide Maßnahmen zu einer Erhöhung der Spannung im Kern, der jedoch nicht höher belastet werden darf. Als Lösung bietet es sich an, einen steiferen CFK als Hautwerkstoff zu verwenden, was zu einer Senkung der Spannung im Kern führt. Dieser so gewonnene Spielraum kann für eine Verringerung der Dicke der Haut genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit, Gewicht und Material einzusparen, besteht im Absenken der Hautstärke zur Mastspitze hin. Dort wäre die daraus resultierende

Spannungserhöhung im Kern hinnehmbar, weil der Kernwerkstoff mit der Höhe zunehmend schwächer belastet ist. Da die Hautschichten mit einer Masse von 204 kg 43,8 % der Gesamtmasse des Mastes ausmachen, ist eine Optimierung der Spannung in der Haut lohnenswert.

Interessant ist die sehr schlechte Eignung von Magnesium als Kernwerkstoff, obwohl es nach Abbildung 2 als gut geeignet zu charakterisieren ist. Die Ursache für diese Diskrepanz ist die Tatsache, dass das Werkstoffdiagramm für das Verhalten unter Schubbeanspruchung erstellt worden ist, der Kern jedoch auch Normalspannungen aufgrund der Biegung und der Normalkräfte aufnehmen muss. Diese sind umso höher, je steifer der Werkstoff ist, wie man an der Ableitung der Biegespannung nach dem E-Modul des Kernwerkstoffes

$$\frac{d \cdot \sigma_{K,Biegung}}{d \cdot E_K} = \frac{M \cdot x_3 \cdot b \cdot (E_H \cdot h_H^3 + 3 \cdot E_H \cdot h_H \cdot (h_H + h_K)^2)}{6 \cdot D_{Spannung}^2}$$

erkennen kann. In dieser Gleichung können lediglich die Größen M und x_3 negativ werden, doch in ihrer Kombination führen sie stets zu betragsmäßig höheren Spannungen. Am Regalbediengerät führt ein positives Drehmoment M zu einer Zugbelastung im Bereich $x < 0$. Für diesen Fall gilt nach obiger Gleichung

$$\frac{d\sigma}{dE_K} > 0,$$

weshalb die Spannung größer wird. Auf der Druckseite des Mastes ($x > 0$) wird die Ableitung hingegen negativ, was eine Zunahme der Druckspannung bei einer erhöhten Steifigkeit des Kernwerkstoffes beschreibt. Dies bedeutet, dass auch auf der Druckseite der Betrag der Spannung größer wird. Für ein negatives Drehmoment und die Spannung aufgrund der Normalkraft kann man denselben Effekt analog zeigen. Das E-Modul von Magnesium ist mit 44,75 MPa so hoch, dass der Kern einen bedeutenden Anteil an Normalspannung aufnimmt, weshalb die Anwendung des für reinen Schub hergeleiteten Diagramms unzulässig ist.

Wirtschaftlich ist der Mast in Sandwichbauweise seinem Gegenstück aus Stahl nach einer ersten Analyse unterlegen. Setzt man jedoch die weiter oben vorgeschlagenen Maßnahmen zur Verringerung der Masse des Mastes um, kann sich die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugunsten des Leichtbaus verschieben, da erstens die Materialkosten sinken und zweitens die Energieeinsparung steigt. Dies gilt insbesondere für eine Verringerung der Dicke der Hautschichten zur Mastspitze hin.

Literatur

- [Alt04] Altenbach, H.; Altenbach, J.: *Mechanics of composite structural elements*, Berlin: Springer-Verlag, 2004
- [Ash05] Ashby, M. F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005

- [Ber92] Bergmann, H.: *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*, Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [Ces10] *CES Edupack 2010*, Version 6.2.0, Granta Design Limited, Cambridge
- [Fri10] Friedrich, C.-C.: *Konzeption des Mastes eines Regalbediengerätes*, Karlsruhe, 2010
- [Gro07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, 22. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [Gro05] Gross, D.; Hauger, W.: *Technische Mechanik 2*, Berlin: Springer, 2005
- [Kle09] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- [Sch10] Schuhmacher, M.: *Energiesparen mit System – Effiziente Antriebstechnik in der Intralogistik*, VDI-IFL Sommerseminar 2010, Karlsruhe: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie, 2010
- [Wie07] Wiedemann, J.: *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*, Berlin: Springer Verlag, 2007