

**Leichtbau am Beispiel eines Kleinteile-Regalbediengerätes**  
*Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit durch Einsatz neuer Materialien*

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
angenommene

**Dissertation**  
von  
Dipl.-Ing. Peter Linsel

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.2017  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Henning



# Zusammenfassung

Heutige Bestrebungen zur Verbesserung der ökonomischen Ziele der Logistik schließen auch den Energieverbrauch mit ein. Bisherige Ansätze der Energieeffizienzsteigerung bei fördertechnischen Anlagen haben den Fokus auf der Energierückgewinnung bzw. auf dem konstruktiven Leichtbau. In Zukunft wird es durch Einsatz alternativer Materialien möglich sein, fördertechnische Anlagen noch deutlicher bzgl. ihres Gewichts zu optimieren.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Regalbediengerät bezüglich der Möglichkeit zur Gewichtsreduzierung untersucht. Nach Identifizierung des Mastes als Bauteil mit dem größten Potential wird dieser durch Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in seinem Gewicht reduziert. Da jedoch die Herstellung durch Einsatz faserverstärkter Kunststoffe im Vergleich zu den bisher üblichen Werkstoffen Stahl bzw Aluminium teurer ist, schließt eine wirtschaftliche Betrachtung an.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz leichterer Materialien bei einem Regalbediengerät möglich ist, jedoch die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu heutigen Regalbediengeräten nur unter bestimmten Einsatzbedingungen gegeben ist.





# Abstract

To optimize logistics operations energy saving activities will be more in focus in future. Today's activities focus on energy recovery and light weight construction by using the same materials. However energy saving potentials of technical equipment (e.g. storage and retrieval machine, stacker crane) needs to be reviewed regarding the equipment weight. By using new materials the weight of the technical equipment can be reduced significantly.

With this thesis the potential of reducing weight of a storage and retrieval machine is analyzed. For this machine the main beam shows the biggest potential in saving weight and energy. A concept is worked out to build up this beam with fibre reinforced plastics. Because such materials are more expensive compared to steel as currently most used material (material itself and manufacturing) a cost effectiveness analysis is executed.

As a summary the use of lighter materials is possible, but economic advantages are only partly given.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Problemstellung und -abgrenzung . . . . .	3
1.2. Gewichtsoptimierung am Beispiel Regalbediengerät (RBG) . . . . .	5
1.3. Ziel der vorliegenden Arbeit . . . . .	7
1.4. Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2. Problemlösungsprozess</b>	<b>9</b>
<b>3. Regalbediengeräte</b>	<b>13</b>
3.1. Allgemeiner Aufbau von Regalbediengeräten . . . . .	13
3.2. Baugruppen eines Regalbediengerätes . . . . .	15
<b>4. Werkstoffe</b>	<b>19</b>
4.1. Allgemeine Werkstoffe . . . . .	19
4.2. Faser-Kunststoff-Verbund . . . . .	21
4.2.1. Fasern . . . . .	21
4.2.2. Matrix . . . . .	23
4.2.3. Mechanische Eigenschaften . . . . .	24
4.2.4. Temperatureinfluss . . . . .	25
4.2.5. Herstellverfahren . . . . .	26
4.3. Zusammenfassung . . . . .	28
<b>5. Definition der Anforderungen</b>	<b>29</b>
5.1. Regalbediengerätetyp und Anwendungsfall . . . . .	29
5.1.1. Technische Daten des gewählten RBG . . . . .	29
5.1.2. Bestimmung des Bauteils zur Substitution . . . . .	30
5.2. Ableitung der Belastungen . . . . .	35
5.2.1. Regellastfälle . . . . .	36
5.2.2. Sonderlastfälle . . . . .	37
5.2.3. Bestimmung der maximalen Mastauslenkung . . . . .	37
5.3. Bestimmung der benötigten Maststeifigkeit . . . . .	39
<b>6. Werkstoffauswahl</b>	<b>41</b>
6.1. Vorgehen bei der Werkstoffauswahl . . . . .	41
6.1.1. Der Auswahlprozess nach Ashby . . . . .	44
6.1.2. Der Auswahlprozess nach Reuter . . . . .	49
6.1.3. Der Auswahlprozess nach Kutz . . . . .	50
6.1.4. Der Auswahlprozess nach Grosch . . . . .	51

6.2. Materialauswahl RBG-Mast . . . . .	51
6.3. Zusammenfassung des ausgewählten Materials . . . . .	58
6.3.1. Kohlenstofffasern . . . . .	58
6.3.2. Epoxidharz als Matrix . . . . .	59
<b>7. Substitution</b>	<b>61</b>
7.1. Auswahl der Mastgeometrie . . . . .	61
7.2. Nachweis der Betriebssicherheit . . . . .	62
7.3. Oberflächenbelastung durch Überrollen . . . . .	63
7.4. Beschreibung des RBG mit substituiertem Mast . . . . .	65
<b>8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>67</b>
8.1. Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	67
8.1.1. Bestimmung der Spielzeit . . . . .	68
8.1.2. Aufbau der Kostenfunktion . . . . .	70
8.1.3. Implementierung des Modells . . . . .	73
8.2. Validierung des Modells . . . . .	73
<b>9. Bewertung</b>	<b>77</b>
9.1. Energieeffizienter Betrieb . . . . .	78
9.1.1. Konstanter Strompreis . . . . .	78
9.1.2. Konstante Investition . . . . .	79
9.2. Spielzeiteffizienter Betrieb . . . . .	81
9.2.1. Definition des Beispiellagers . . . . .	81
9.2.2. Szenario 1: Konstante Zugriffszeit je Gasse . . . . .	82
9.2.3. Szenario 2: Konstanter Durchsatz des Lagers . . . . .	83
<b>10. Zusammenfassung</b>	<b>87</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>
<b>A. Darstellung der Herstellverfahren</b>	<b>93</b>
<b>B. Bestimmung der Maststeifigkeit</b>	<b>101</b>
<b>C. Auflistung der FVK</b>	<b>103</b>
C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften . . . . .	103
<b>D. Details des Werkstoffes Kohlenstofffaser verstärktes Epoxidharz</b>	<b>113</b>
<b>E. Beschreibung der Abschreibungsmethodiken</b>	<b>115</b>
E.1. Leistungsbezogene Abschreibung . . . . .	115
E.2. Geometrisch-degressive Abschreibung . . . . .	115
E.3. Arithmetisch-degressive Abschreibung . . . . .	116

<b>F. Eingabeparameter zur Verifizierung des Modells der Berechnung der Wirtschaftlichkeit</b>	<b>117</b>
<b>G. Ausgewählte Eingabemasken des Modells der Berechnung zur Wirtschaftlichkeit</b>	<b>123</b>
<b>H. Detaillierte Daten der Bewertung</b>	<b>125</b>



# Tabellenverzeichnis

4.1. Eigenschaften der Fasern . . . . .	23
5.1. Technische Daten RBG . . . . .	30
5.2. Massenaufteilung eines AKL-RBG . . . . .	31
5.3. Benötigte Kraft und Arbeit zum Bewegen des Hubwagens . . . . .	33
5.4. Benötigte Kraft und Arbeit zum Bewegen des Mastes . . . . .	33
5.5. Verhältnis entsprechend der Kriterien a) Potential Energieeinsparung aufgrund von Massereduktion und b) Potential Wirtschaftlichkeit Herstellung	35
5.6. Technische Daten zur Bestimmung der Auslenkung . . . . .	38
6.1. Bekanntheitsgrad eines Materials . . . . .	42
6.2. Materialauswahl für einen leichten Stab mit vorbestimmter Steifigkeit und Festigkeit . . . . .	46
6.3. Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit des Mengenverhältnisses Faser zu Matrix am Beispiel des Werkstoffes Epoxidmatrix mit Aramidfaser verstärkt als unidirektionales Composite (Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate) . . . . .	54
6.4. Endaufstellung der FKV (Ashby 2012) . . . . .	57
8.1. Eingabeparameter für Wirtschaftlichkeitsmodell . . . . .	70
9.1. Basisdaten . . . . .	77
9.2. Beschleunigungswerte und Spielzeit bei konstantem Stromverbrauch . . . . .	83
9.3. Vergrößerung des Regals (in Anzahl Stellplätze angegeben) bei gleicher Spielzeit (21,96 s) und gleichem Stromverbrauch . . . . .	83
9.4. Regalabmessungen . . . . .	84
9.5. Konstante Werte eines Kleinteile-AKL . . . . .	85
A.1. Relativer Kostenindex der Herstellungsverfahren . . . . .	93
D.1. Kohlenstofffaser verstärktes Epoxidharz, Werkstoffdaten . . . . .	114
H.1. Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 1.500kg . . . . .	126
H.2. Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 3.000kg . . . . .	126
H.3. Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 500 kg Gewichtserparnis . . . . .	126

H.4. Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 2.000 kg Gewichtser- sparnis . . . . .	126
---	-----



# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Shuttle-System zur Lagerung von Kleinteilen (psb intralogistics GmbH) . . . . .	2
1.2.	Deutsche Produktion - Top 10 des Maschinen- und Anlagenbaus aus den Jahren 2009 und 2010, Angaben in Mrd. EUR . . . . .	4
1.3.	a) Stetigförderer (Interroll AG), b) Flurförderfahrzeug (Jungheinrich AG), c) RBG (Dambach Lagersysteme GmbH & Co. KG) . . . . .	5
1.4.	Energieverbrauchsanteile zum Bewegen eines Unstetigförderers bzw. dessen Last . . . . .	6
2.1.	Problemlösungsweg . . . . .	10
3.1.	Lager mit Regalbediengerät und Ein- und Auslagerungspunkt . . . . .	14
3.2.	Klassifizierung eines RBG, Einleitung der senkrechten Hauptreaktionskräfte: links: hängend; mitte: oben laufend; rechts: unten laufend . . . . .	16
3.3.	Schematische Darstellung eines Regalbediengerätes (RBG) mit a) Hubwagen; b) Mast; c) Fahrwerk; d) Mastkopf . . . . .	17
4.1.	Glasübergangsbereich nach (Ehrenstein 2006) und (Schürmann 2007) . . . . .	25
4.2.	Vorgefertigte Halbzeuge: a) Gewebe, b) Multiaxialgelege und c) Matte bzw. Vlies nach (Schürmann 2007) . . . . .	26
5.1.	Funktionsstruktur . . . . .	35
5.2.	Maststruktur zur Bestimmung der maximalen Auslenkung . . . . .	37
6.1.	Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren mit werkstoffrelevanten Feldern . . . . .	43
6.2.	Werkstoffübersicht . . . . .	47
6.3.	Trade-off Strategie . . . . .	48
6.4.	Werkstoffauswahl (Grosch 1986) . . . . .	52
6.5.	FKV Dichte auf E-Modul aufgetragen . . . . .	54
6.6.	Metall im Vergleich zu FKV . . . . .	55
6.7.	FKV E-Modul zu Preis . . . . .	56
6.8.	Endauswahl FKV . . . . .	57
6.9.	FKV Preis zu Dichte . . . . .	58
6.10.	FKV Preis zu E-Modul . . . . .	59
7.1.	Darstellung des Querschnittes des Pultrusionsprofils . . . . .	62
7.2.	Überrollen eines Rades auf einer Ebene . . . . .	64
8.1.	Aufbau des Berechnungsmodells . . . . .	68

8.2.	Darstellung eines Einzelspiels (links) und eines Doppelspiels (rechts) . . .	69
8.3.	Schematische Darstellung Kostenfunktion für die Betriebskosten . . . . .	72
8.4.	Schematische Darstellung der Kostenfunktion für die Betriebskosten; Par- allelverschiebung um die Investitionskosten . . . . .	72
9.1.	Stromverbrauch in Abhängigkeit der Masse . . . . .	78
9.2.	Zulässige Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit nach x Jahren .	79
9.3.	Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 500 kg Gewichtser- sparnis . . . . .	80
9.4.	Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 2000 kg Gewichtser- sparnis . . . . .	80
9.5.	Anzahl Doppelspiele je Tag bei konstantem Stromverbrauch . . . . .	82
A.1.	Wickelverfahren . . . . .	94
A.2.	Pultrusionsverfahren . . . . .	95
A.3.	Auftragende Methode . . . . .	96
A.4.	BMC . . . . .	97
A.5.	RTM . . . . .	98
A.6.	Vakuum-RTM . . . . .	99
F.1.	Gemeinsame Parameter . . . . .	117
F.2.	Spezifische Daten existierendes RBG . . . . .	118
F.3.	Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen und gleich- bleibender Fahrdynamik . . . . .	119
F.4.	Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleich- bleibendem Energiebedarf . . . . .	120
F.5.	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	121
G.1.	Eingabemaske für Daten (Beispielhaft für Regalbediengerät bei neuarti- gem Werkstoff und gleichbleibender Fahrdynamik) . . . . .	124
H.1.	Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsredu- zierung von 3.500kg auf 1.500kg . . . . .	127
H.2.	Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsredu- zierung von 3.500kg auf 3.000kg . . . . .	127
H.3.	Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsredu- zierung von 3.500kg auf 3.000kg . . . . .	128
H.4.	Anzahl Stellplätze bei Minimierung der Masse und gleichem Stromverbrauch	128

# Abkürzungsverzeichnis

$\Phi$	Biegeformfaktor
$\psi$	Hublastbeiwert
$\rho$	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Spannung [N/m <sup>2</sup> ]
A	Wandparameter
a	Beschleunigung (positiv) bzw. Verzögerung (negativ) [m/s <sup>2</sup> ]
B, b	Breite [m]
BMC	Bulk Molding Compound
c	Rollwiderstandsbeiwert
E	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
e	Bruchdehnung
F	Kraft [N]
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
G	G-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
g	Gewichtskraft [kg]
H, h	Höhe [m]
I	Flächenträgheitsmoment [m <sup>4</sup> ]
K	Kosten [EUR]
L, l	Länge [m]
LAM	Lastaufnahmemittel
Lf	Kostenfaktor
M	Moment [Nm]

## Abbildungsverzeichnis

m	Masse [kg]
p	Hertzsche Pressung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
PA	Polyamide
PBO-Fasern	Polymere Hochleistungsfaser (Poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)); Handelsname: Zylon
PBT	Polybutylenterephthalat
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
R	Streckgrenze [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
RBG	Regalbediengerät
RTM	Harzguss/Resin Transfer Molding
S	Schwingbeiwert
s	Steifigkeit [ $\text{N}/\text{m}$ ]
s	Strecke [m]
SMC	Sheet Moulding Compound
T	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
t	Zeit [s]
V	Volumen [ $\text{m}^3$ ]
v	Geschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [W]
w	Auslenkung [cm]
WM	Widerstandsmoment [ $\text{mm}^3$ ]

# 1. Einleitung

Der Begriff der Logistik findet im Bereich der Wirtschaft erst seit den 50iger Jahren des vorigen Jahrhunderts in den USA und später auch in Deutschland Verwendung (Arnold 2008, Seite 11). Jedoch reichen die Aufgaben, welche hinter dem Begriff der Logistik stehen, weit in die Vergangenheit zurück. So stellte zum Beispiel der Pyramidenbau in Ägypten große logistische Herausforderungen dar. Das Baumaterial musste zu der Baustelle gebracht und dort entsprechend gelagert, bearbeitet und verteilt werden. Auch sind kriegerische Auseinandersetzungen seit deren Existenz nicht ohne eine Logistik möglich; Truppen müssen bewegt und versorgt werden.

Heute sind logistische Prozesse Transport- und Lagerungsprozesse<sup>1</sup>. Logistische Prozesse sind auf eine bedarfsgerechte Verfügbarkeit von Waren bzw. Objekten ausgerichtet. Die Intralogistik ist ein Teil der Logistik, die sich mit innerbetrieblichen Prozessen beschäftigt. Primäre Aufgabe dabei ist die Ver- und Entsorgung von Maschinen- und/oder Handarbeitsplätzen zwischen Wareneingang und Warenausgang eines Produktions- oder Distributionszentrums. Dazu gehört neben den reinen Transportaufgaben auch die Lagerung. Um diese Aufgaben auszuführen werden fördertechnischen Einrichtungen verwendet. (Gudehus 2011)

In der innerbetrieblichen Logistik bzw. Intralogistik überbrücken Lager die zeitliche Asynchronität zwischen Erzeugung und Verbrauch und stellen erforderliche Waren bereit. Durch stets zu steigende Produktionszahlen stiegen die Anforderungen an den innerbetrieblichen Materialfluss und somit auch an die Lagertechnik stetig. Aufgrund der begrenzt vorhandenen Fläche entstanden in den 1950er-Jahren erste Blocklager, um mehr Waren auf der gleichen Grundfläche einlagern zu können. Blocklager sind eine Art der Bodenlagerung<sup>2</sup>, bei der die Ladeeinheiten mehrfach übereinander gestapelt und in einem Block ohne Zwischengänge zusammen gefasst sind (Arnold 2008, Seite 648). Zur Bedienung der Blocklager wurden unter anderem Stapelkrane eingesetzt (Arnold 2008, Seite 649).

Bei der Blocklagerung ist jedoch nicht jede Ladeinheit direkt erreichbar. Aus dieser Problematik heraus entstanden erste Regallager mit einfach tiefer Belegung. Zwischen den Regalen waren Gassen angeordnet, über welche die Lagerplätze des Regals angefahren werden konnten. Diese Lager wurden manuell oder mittels Gabelstapler bedient. Im

---

<sup>1</sup>Lagerungsprozesse sind u.a. Be- und Entladen, Ein- und Auslagern, Kommissionieren, Sortieren und Verpacken.

<sup>2</sup>In einem Bodenlager werden die Ladeeinheiten prinzipiell auf dem Boden abgestellt. (Arnold 2008, Seite 648f)

## 1. Einleitung

Zuge der Weiterentwicklung dieser Regaltechnik bei Regalhöhen von auch über 40 Metern entstanden sog. Regalbediengeräte (RBG) zum Bedienen dieser Regale. Diese RBG waren gassengebunden. Folglich wurde zwar für jede Gasse ein RBG benötigt, allerdings konnte der Durchsatz deutlich gesteigert werden.

Neben den Regalbediengeräten werden zum Bedienen von Regalen je nach Automatisierungsgrad auch weitere technische Systeme eingesetzt. So können zum Beispiel Gabelstapler (Abbildung 1.3, b) als eine weniger automatisierte Variante eingesetzt werden. Weiter gibt es sog. Shuttle-Lösungen (Abbildung 1.1), die vor allem bei Waren eingesetzt werden, welche kleiner einer Palettengröße<sup>3</sup> sind.

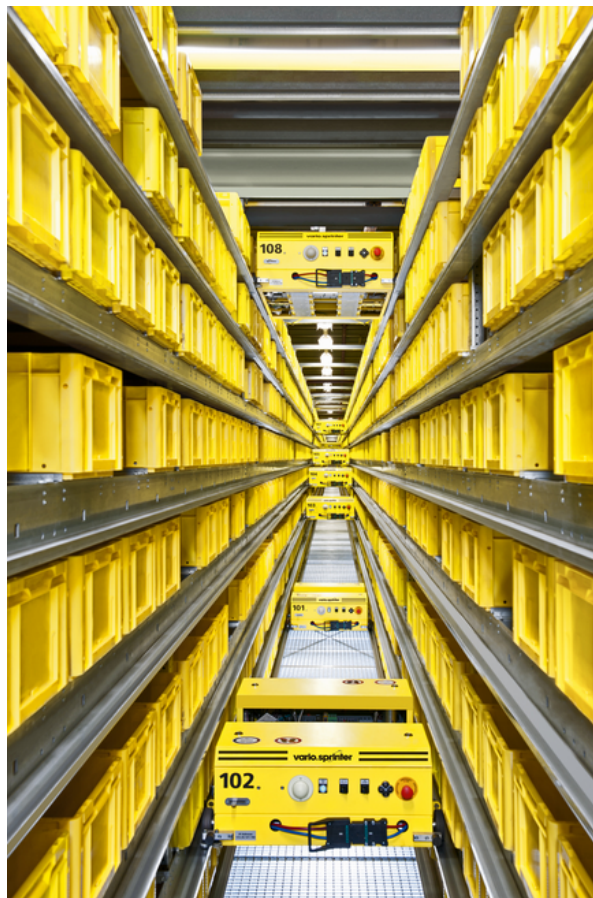


Abbildung 1.1.: Shuttle-System zur Lagerung von Kleinteilen (psb intralogistics GmbH)

Im heutigen Kontext müssen Unternehmen im Bedarfsfall in einem immer flexibler werdenden Markt schnell Produkte wirtschaftlich liefern können. Daher wird eine effiziente Logistik benötigt. “Das allgemeine ökonomische Ziel der Effizienz bedeutet für die

---

<sup>3</sup>Standard-Paletten im Euro-Format haben eine Grundfläche von  $1.200 \times 800 \text{ mm}$ . Als zweites Standardmaß hat sich das sog. Industriemaß mit einer Grundfläche von  $1.200 \times 1.000 \text{ mm}$  durchgesetzt. (Gudehus 2011)

Logistik, dass die Kosten der logistischen Prozesse für die jeweilige Leistung minimal und ihre Leistung bei den jeweiligen Kosten maximal sein sollen.” (Arnold 2008, Seite 7.). Als Bestandteil der Logistikkosten können die Kosten der Lagerung reduziert werden, indem Kosten für die Fördermittel gesenkt werden. Dies kann durch niedrigere Kosten für die Fördermittel selbst, eine höhere Dynamik der Fördermittel (und folglich einer höheren Leistung) und durch niedrigere Energiekosten erreicht werden.

### 1.1. Problemstellung und -abgrenzung

Heutige Bestrebungen zur Verbesserung der ökonomischen Ziele der Logistik schließen auch den Energieverbrauch mit ein. Aufgrund der steigenden Kosten für den Energieträger (Erdöl, Erdgas, regenerative Energien) ist hier ein Optimierungspotential vorhanden. Schwankungen bei den Preisen für Erdöl und Erdgas beeinflussen zwar nicht immer unmittelbar den Strompreis, sie haben aber deutlichen Einfluss darauf. (Weyerstrass, Jaenicke, and Schönplflug 2008) prognostizieren stark ansteigende Strompreise bis 2020 zwischen 33% und 38%. “Die Modelle mit den besten statistischen Eigenschaften lassen bis 2020 einen Anstieg der Preise für Grundlast an der Europäischen Energiebörse von derzeit 65 Euro/MWh auf 255 bis 295 Euro/MWh erwarten.”(Weyerstrass, Jaenicke, and Schönplflug 2008, S. 24)

Im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus nimmt die Fördertechnik neben der Antriebstechnik eine wichtige Stellung ein (siehe Abbildung 1.2). Des weiteren wird die Europäische Union bis zum Jahr 2020 Richtlinien erarbeiten, durch welche die Energieeffizienz fördertechnischer Anlagen analysiert und beziffert werden. Ziel der EU ist es hierbei, systemrelevante Energieverbräuche fördertechnischer Systeme aufzuzeigen und dadurch transparent zu gestalten, um den Wettbewerb verschiedener Hersteller auch im Bereich der Energieeffizienz zu ermöglichen. (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012), (Europäische Kommission 2011)

Auf Basis der dargestellten Sachverhalte, Steigerung des Strompreises sowie Eingriffe der Legislative im Bereich der transparenten Darstellung der Energieverbräuche, wird die Wichtigkeit von

- Senkung der Energiekosten,
- Verbesserung der Umweltauswirkungen sowie
- Erhöhung der Dynamik

im Bereich der Intralogistik deutlich. In Zukunft sollte es möglich sein, fördertechnische Anlagen noch deutlicher bzgl. ihres Gewichts zu optimieren, um die Energieeffizienz steigern zu können. Dieser Parameter wird im Folgenden näher betrachtet.

## 1. Einleitung

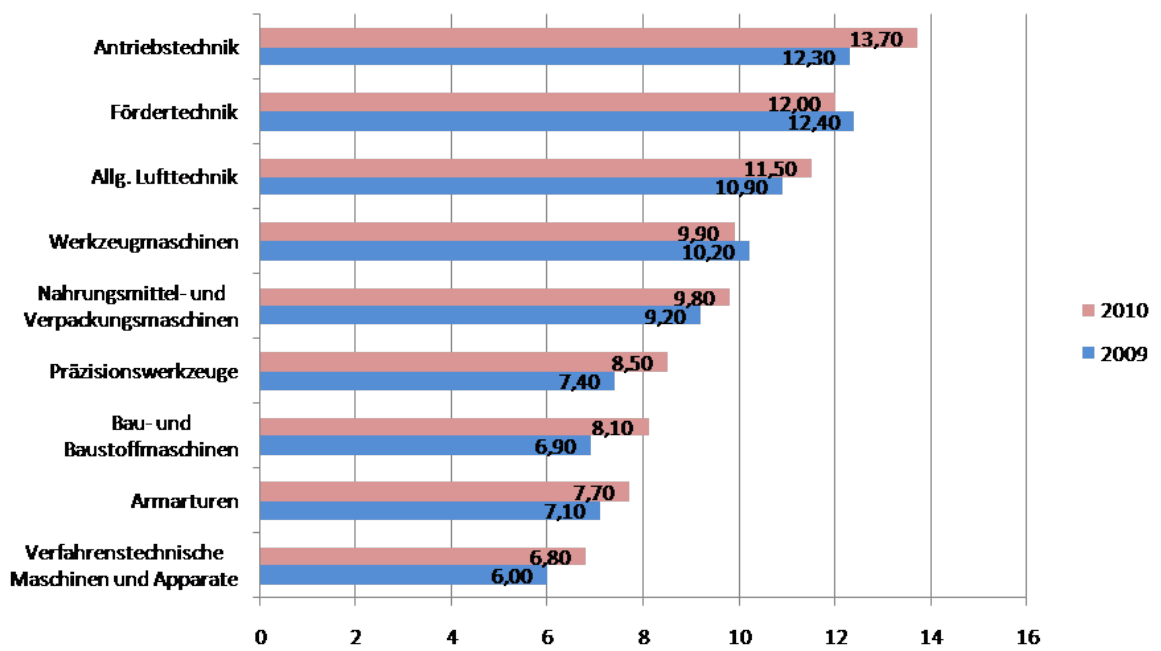


Abbildung 1.2.: Deutsche Produktion - Top 10 des Maschinen- und Anlagenbaus aus den Jahren 2009 und 2010, Angaben in Mrd. EUR (VDMA 2010)



## 1.2. Gewichtsoptimierung am Beispiel Regalbediengerät (RBG)

Die Fördertechnik kann in zwei unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Zum einen gibt es Stetigförderer, die Güter mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit transportieren (siehe Abbildung 1.3, a). Daneben gibt es Unstetigförderer, die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen ausgesetzt sind (Abbildung 1.3, b und c). Da im Gegensatz zum Bewegen bei konstanter Geschwindigkeit die Beschleunigung wesentlich mehr Energie benötigt, wird das Hauptaugenmerk auf Unstetigförderer gelegt. Hier ist das größte Potential, den Energieverbrauch und daraus resultierende negative Umweltauswirkungen zu reduzieren. Ziel ist es, die bewegten Massen von Unstetigförderern zu senken.



Abbildung 1.3.: a) Stetigförderer (Interroll AG), b) Flurförderfahrzeug (Jungheinrich AG), c) RBG (Dambach Lagersysteme GmbH & Co. KG)

Ein Regalbediengerät (RBG) ist in einem automatisierten Lager ein zentrales förder-technisches Element. Die Umschlagleistung eines Lagers wird zu einem nicht unerheblichen Teil durch die Spielzeit des RBG beeinflusst. Sie ist die durchschnittliche Zeit für ein Ein- und Auslagerungsprozess. (Koether 2007, Seite 87 ff)

Die mittlere Spielzeit eines RBG ist nach (VDI 3561 1973) abhängig von

- Regallänge und Regalhöhe,
- Lagekoordinaten der Ein- und Auslagerungsbereitstellplätze,
- Maximalgeschwindigkeiten und mittleren Beschleunigungs- und Bremswerten in jede Bewegungsrichtung sowie
- Schalt-, Kontroll- und Positionierzeiten.

## 1. Einleitung

Die Bestimmung der Spielzeit wird in Kapitel 8 näher erleutert.

Durch eine höhere Dynamik der RBG lässt sich die Spielzeit reduzieren. Dadurch kann die Umschlagleistung eines Lagers erhöht und zur schnelleren Bereitstellung der Waren beigetragen werden. Durch eine Massenreduzierung kann die angestrebte höhere Dynamik mit gleichbleibender Motorleistung erreicht werden. Dies bewirkt auch einen gleichbleibenden Energieverbrauch und gleichbleibende Stromkosten. Wird keine höhere Dynamik des RBG benötigt, kann durch eine Massenreduzierung bei gleichbleibender Dynamik die benötigte Motorleistung reduziert werden. Bei einer reduzierten Antriebsleistung ist auch der Energieverbrauch geringer.

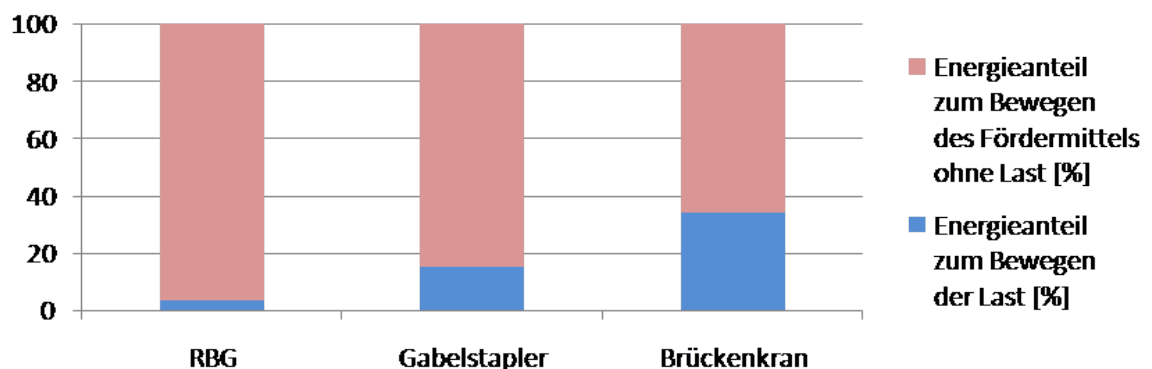


Abbildung 1.4.: Energieverbrauchsanteile zum Bewegen eines Unstetigförderers bzw. dessen Last

(Furmans and Linsel 2011)

Bisherige Ansätze der Energieeffizienzsteigerung bei RBG hatten den Fokus auf der Energierückgewinnung. Eine Möglichkeit ist die Rückspeisung von Bremsenergie in das Stromnetz. Hierbei wird die beim Bremsen frei werdende Energie zum Teil nicht in Wärme, sondern in elektrische Energie umgewandelt und in das Stromnetz gespeist. Eine zweite Möglichkeit ist die sogenannte Zwischenkreiskopplung. Dabei wird beispielsweise beim Abbremsen des RBG die gewonnene Bremsenergie zum Beschleunigen des Hubwagens (oder umgekehrt) genutzt. Die Effizienz kann dabei bis zu 60% betragen. (Schumacher 2010)

Diese Ansätze lösen allerdings nicht die Problematik des ungünstigen Verhältnisses der Masse zur Nutzlast. Abbildung 1.4 zeigt die Energieverbrauchsanteile zum Bewegen eines Unstetigförderers bzw. dessen Last für am Markt derzeit erhältliche Geräte.

Versuche zum Leichtbau in der Intralogistik im Allgemeinen wie auch spezielle Entwicklungsarbeiten im Bereich der Unstetigförderer setzten bisher stets auf Metalle als Werkstoff. Durch festigkeitsoptimierte Querschnitte, verminderte Materialdicken, belastungsadaptierte Formgebung oder spezielle Fachwerkstrukturen können nur noch geringe weitere Gewichtseinsparungen erzielt werden. Großes Potenzial hat die Gewichtsreduzierung des RBG mittels Faserverbundwerkstoffen (FVW). Der Einsatz von Faser-

verbundwerkstoffen als bzw. in Bauelementen der Fördertechnik lässt erwarten, dass durch deutliche Gewichtseinsparungen entweder ein geringerer Energiebedarf bei gleichbleibender Bewegungsdynamik oder eine größere Dynamik bei gleichbleibendem Energiebedarf erzielt werden kann. (Bräuning 2010)

Warum neue Werkstoffe zur Gewichtsoptimierung eingesetzt werden sollten, beantwortet (Reuter 2007, Seite 16ff) mit den folgenden 5 Aspekten:

- *Marktesetze*: Um Produkte wettbewerbsfähig zu halten, müssen sie in einem kontinuierlichen Prozess verbessert werden. Hierzu stehen zwei Merkmale zur Diskussion, die technische und die wirtschaftliche Leistung. Die technische Leistung soll ein Produkt leistungsfähiger und für den Markt interessanter machen. Bzgl. der wirtschaftlichen Leistung soll ein Produkt entweder im Anschaffungspreis für den Kunden günstiger oder eventuelle höhere Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten gerechtfertigt sein. Über die Einsatzzeit müssen sich somit die höheren Anschaffungskosten durch die geringeren Betriebskosten amortisieren.
- *Erschließung neuer Märkte oder Kundenwünsche*: “In der Regel stellt ein neues Produkt keine Neuerfindung dar, sondern die Weiterentwicklung bestehender Erzeugnisse des Unternehmens.” (Reuter 2007, Seite 18). Neu- und Weiterentwicklungen sollen neue Märkte erschließen bzw. zusätzliche Kundenwünsche (z.B. geringeren Energieverbrauch) erfüllen.
- *Qualitätsprobleme*: Qualitätsprobleme können den Erfolg eines Produktes am Markt nachhaltig gefährden. Folglich müssen bei Qualitätsproblemen (z.B. zu geringe Festigkeiten eines Bauteils) Maßnahmen zur Verbesserung ergriffen werden. Um die Festigkeit zu erhöhen, kann dies auch den Austausch des Werkstoffes zur Folge haben.
- *Normen, Vorschriften oder ein sich änderndes Umweltverständnis*: Bestimmungen können sich ändern. Folglich unterliegen auch Produkte diesbezüglich einem Wandel. Ein Beispiel ist das Herstellungs- und Anwendungsverbot von Asbest. Während in den 1970iger Jahren Häuser mit Asbest ausgekleidet wurden, wurde in der nachfolgenden Zeit eine große Gesundheitsgefährdung ausgehend vom Asbest festgestellt. Dies hat zu einem Verbot dieses Materials geführt. Folglich musste im Hausbau ein neues Material zur Wärmedämmung genutzt werden.
- *Standardisierung*: Standardisierung im Unternehmen bedeutet Kosten senken, folglich ist der Hersteller an Standards interessiert. Sollen gleiche Werkstoffe bei verschiedenen Geräten eingesetzt werden (zur z.B. vereinfachten Bauteilprüfung), so müssen die Werkstoffe teilweise ersetzt werden.

### 1.3. Ziel der vorliegenden Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, mittels eines zu erarbeitenden Modells Entwicklungen im Bereich der Gewichtsoptimierung bei Regalbediengeräten bzgl. ihrer Wirtschaftlichkeit zu

## 1. Einleitung

prüfen. Dabei soll überprüft werden, ob nichtmetallische Faserverbundwerkstoffe bei Regalbediengeräten technisch eingesetzt werden können und ob diese Substitution der Werkstoffe einen wirtschaftlichen Erfolg versprechen kann.

Mit Faserverbund-Werkstoffen kann der Leichtbau deutlich optimiert werden. Wird das Gewicht reduziert, wird i.d.R. das RBG teurer. Aktuell sind Faserkunststoff-Verbunde (FKV) gegenüber Standardwerkstoffen (wie z.B. Metalle) für die gleiche Anwendung teurer. Somit ist bei Einsatz dieser Materialien die Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung. Mehrkosten aufgrund von Leichtbau alleine sind nur selten durchsetzbar. Eine Kostenbetrachtung soll zeigen, in welchem Verhältnis Investitionskosten zu Betriebskosten stehen, um ein RBG mit FKV wirtschaftlich zu betreiben.

Aus diesen Erkenntnissen heraus soll diese Arbeit folgende Problemstellungen behandeln:

- Ist bei einem Regalbediengerät der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden zur Gewichtsoptimierung technisch möglich?
- Lässt sich ein gewichtsoptimiertes Regalbediengerät wirtschaftlich betreiben?

Zur Bearbeitung dieser Problemstellungen wurde der nachfolgend beschriebene Aufbau gewählt.

### 1.4. Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 wird der Prozess der Problemlösung im Allgemeinen näher betrachtet und eine systematische Vorgehensweise in Bezug auf die vorliegende Problemstellung entwickelt. Darauf folgend wird das Regalbediengerät im Detail vorgestellt (Kapitel 3). Hierbei wird neben den Einsatzmöglichkeiten auch auf die heutige Bauart und deren Grenzen eingegangen. In einem nächsten Abschnitt werden die Grundlagen der Werkstoffe erarbeitet (Kapitel 4). Hier werden neben den heute eingesetzten Werkstoffen auch neue Werkstoffe und deren Möglichkeiten aufgezeigt. Anschließend werden die Ziele formuliert und die Randbedingungen abgeleitet (Kapitel 5). Kapitel 6 zeigt die Auswahl des geeigneten Werkstoffes, Kapitel 7 die Substitution des Werkstoffes beim RBG. Eine Bewertung schließt hieran an (Kapitel 8 und 9). Dabei wird auf die Wirtschaftlichkeit im Detail eingegangen. Eine Zusammenfassung (Kapitel 10) schließt diese Arbeit ab.

## 2. Problemlösungsprozess

“Jedes konkrete Problem ist anders und daher ist auch jede konkrete Problemlösung anders. Das heißt aber noch lange nicht, dass es keine Erkenntnisse gäbe, die man von einer Problemlösung auf eine andere übertragen könnte.” (JACOBY 2004, Seite 35) Es gibt verschiedene Methoden bzw. Herangehensweisen, wie Fragestellungen und Herausforderungen methodisch gelöst werden können. In (Fischer and Pfeffel 2010) wird der sogenannte “ganzheitliche, systematische Lösungsentwicklungsprozess (GSLP)” beschrieben. Dieser besitzt Überschneidungen zu den allgemein bekannten Management-Entwicklungs-Methoden. (Fischer and Pfeffel 2010, Seite 59ff) geht auf die Frage ein, ob zuerst ein Problem und daraus ableitend Ziele formuliert werden oder vor der Problemidentifizierung eine Zieldefinition erfolgen soll. Hier bezieht (Fischer and Pfeffel 2010) nicht eindeutig Stellung und überlässt es dem Anwender, die für den entsprechend vorliegenden Anwendungsfall angepasste Vorgehensweise festzulegen.

In der hier vorliegenden Arbeit wird über die Problemdefinition und daraus ableitend die Zielformulierung der Lösungsprozesse angestrebt. In Kapitel 1 werden steigende Stromkosten und somit höhere Betriebskosten beschrieben. Dies ist als Problem identifiziert worden. Als Ziel kann nun die Gewichtsreduzierung abgeleitet werden. Nach Festlegung der Ziele folgt die Suche nach Lösungsalternativen, daran anschließend folgt der Bewertungs- und Entscheidungsprozess.

Nach (Daenzer and Haberfellner 2002) kann die Werkstoffauswahl auf einen allgemeinen Problemlösungsweg zurückgeführt werden. Eine mögliche Vorgehensweise ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Zu Beginn steht die Situationsanalyse, bei der der Istzustand analysiert und festgehalten wird. Anschließend werden über eine wirkungsbezogen zielorientierte Betrachtung die zu erreichenden Ziele formuliert. Aus der Zielformulierung entstehen Soll- und Wunschziele, die zur Synthesenanalyse führen. Die erzeugten Soll- und Wunschziele dienen auch als Kriterien für die Lösungsvarianten. Die Synthesenanalyse erzeugt diese Lösungsvarianten, welche auf Basis der Kriterien (und zusätzlich bei der Erzeugung der Lösungsvarianten definierten ergänzenden Kriterien) im Bereich der Bewertung analysiert werden. Auf Basis dieser Bewertung wird eine Empfehlung ausgesprochen, welche dann zu einer Entscheidung führt. Von der Situationsanalyse kann mittels der strukturbezogenen lösungsorientierten Betrachtung die Synthesenanalyse begonnen werden.

Folglich müssen für die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung eines Produktes folgende Schritte durchgeführt werden:

- *Situationsanalyse*: Die Situationsanalyse beschreibt die aktuelle Situation und gibt

## 2. Problemlösungsprozess

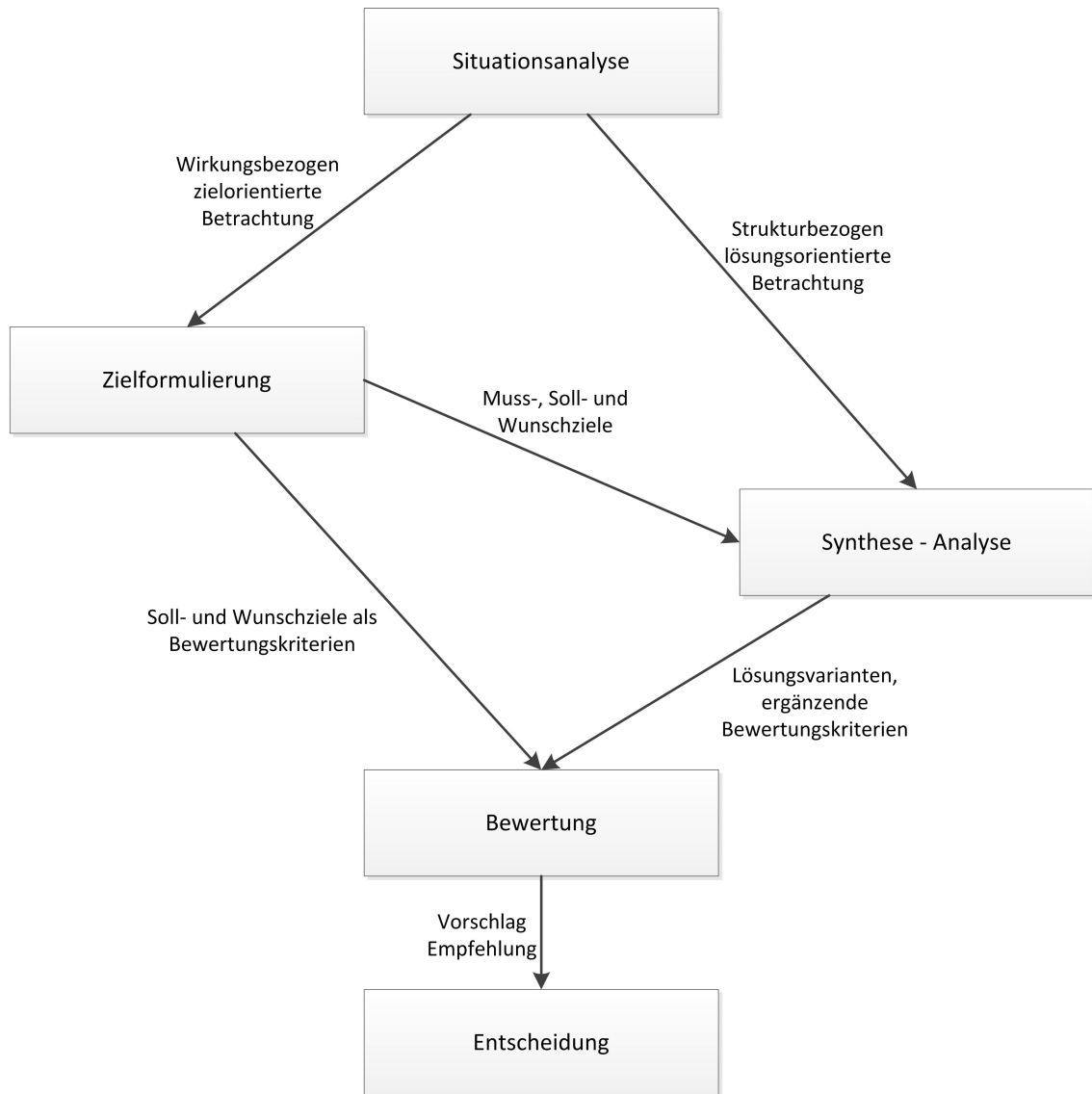


Abbildung 2.1.: Problemlösungsweg  
(Daenzer and Haberfellner 2002, Seite 96), (Reuter 2007, Seite 32)

den Entwicklungsbedarf an.

- *Zielformulierung*: Die Zielformulierung definiert das Forschungsziel, welches erreicht werden soll. In einem weiteren Schritt werden im Detail die Soll- und Wunschziele definiert.
- *Synthese*: Auf Basis der Situationsanalyse und der Ziele wird die Synthese durchgeführt. Hieraus werden verschiedene Lösungsvarianten entwickelt und der Bewertung zugeführt.
- *Bewertung*: Soll- und Wunschziele dienen als Ausgang für die Bewertung der Lösungsvarianten.
- *Entscheidung*: Mittels der Bewertung wird eine Entscheidung getroffen.

Werden die verschiedenen Herangehensweisen bei der Problemlösung gegenüber gestellt, so zeigt sich eine vergleichbare Vorgehensweise. Zuerst wird das Problem in der Istanalyse identifiziert und anschließend eine Zieldefinition vorgenommen. Danach werden Lösungsvorschläge erarbeitet und diese bewertet. Abschließend erfolgt eine Entscheidung auf Basis der Bewertung. Auf Grund dieser Erkenntnis und dem Charakter der hier vorliegenden Fragestellungen wird für das weitere Vorgehen der Problemlösungsprozess in Anlehnung an (Daenzer and Haberfellner 2002) und (Reuter 2007) ausgewählt.

Der in Abbildung 2.1 angegebene Weg, der strukturbezogen lösungsorientierten Ansatz, wird hier nicht weiter verfolgt. Aufgrund der in dieser Arbeit diskutierten Fragestellungen sind Ziele zu definieren, die es zu erreichen gilt. Aus diesem Grund ist der Weg von der Situationsanalyse beginnend hin zur Zielformulierung und Synthese zur abschließenden Bewertung und Entscheidung der geeignete Ansatz. Mit der Zielformulierung zu Beginn werden auch Kriterien definiert, welche für die spätere Bewertung der Lösungsvarianten geeignet sind. Diese Vorgehensweise wird beispielsweise durch (Fischer and Pfeffel 2010) ebenfalls unterstützt.

Die Situationsanalyse wurde bereits in Kapitel 1 begonnen. Ergänzt wird sie durch die Beschreibung der Regalbediengeräte (Kapitel 3) und der Werkstoffe (Kapitel 4). Die Zielformulierung erfolgt in Kapitel 5. Kapitel 6 und 7 beschreiben die Synthese, Kapitel 8 untersucht die Wirtschaftlichkeit. Die Bewertung erfolgt in Kapitel 9.





# 3. Regalbediengeräte

Nach (FEM 9.101 1997, Seite 2) ist ein Regalbediengerät (RBG) “ein Förder- und Hebezeug zur

1. manuellen oder
2. automatischen

mechanischen Bedienung der Regalfächer einer Lageranlage. [...] Ein wesentliches Merkmal des RBG ist das Vorhandensein einer Lastführung (z.B. Mast) zur Aufnahme der Biegemomente aus dem exzentrisch angreifenden Lastgewicht.”

Regalbediengeräte gibt es in verschiedenen Ausführungen. Neben Sonderbauformen für spezielle Ladungen (z.B. Autokarosserien oder Papierrollen für die Druckindustrie) existieren zwei Hauptausführungen. Dies sind zum einen RBG für automatische Kleinteilelager sowie RBG für den Palettentransport.

Bei automatischen Kleinteilelagern werden Transportkisten mit Grundflächen zwischen  $200 \times 300 \text{ mm}$  (L x B) und  $600 \times 800 \text{ mm}$  (L x B) transportiert, die Nutzlast liegt zwischen  $50 \text{ kg}$  und  $300 \text{ kg}$ . Paletten-RBG transportieren i.d.R. Europaletten oder Industriepaletten mit einer maximalen Nutzlast von bis zu  $1.200 \text{ kg}$ .

Übliche Werte sind Traglasten bis  $1000 \text{ kg}$  für Paletten-RBG, Beschleunigungen bis  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und Geschwindigkeiten bis  $360 \frac{\text{m}}{\text{min}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  für Kleinteile-RBG. Am Markt erhältliche Geräte können Fahrgeschwindigkeiten von bis zu  $6,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , Fahrbeschleunigungen von  $6,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ , Hubgeschwindigkeiten von  $3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und Hubbeschleunigungen von  $3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  erreichen (GEBHARDT Fördertechnik GmbH 2012).

## 3.1. Allgemeiner Aufbau von Regalbediengeräten

Ein Regalbediengerät führt drei Hauptbewegungen aus, vgl. Abbildung 3.1: (FEM 9.101 1997)

- *Fahren*: Bewegung des gesamten Gerätes in Gassenlängsrichtung (x-Richtung);
- *Heben*: Vertikale Bewegung des Hubwagens entlang des Mastes (y-Richtung);
- *Ein- und Ausfahren*: Bewegung des Lastaufnahmemittels zur Einlagerung bzw. Entnahme von Ladegütern aus dem Regal bzw. einer Übergabestation (z-Richtung);

### 3. Regalbediengeräte

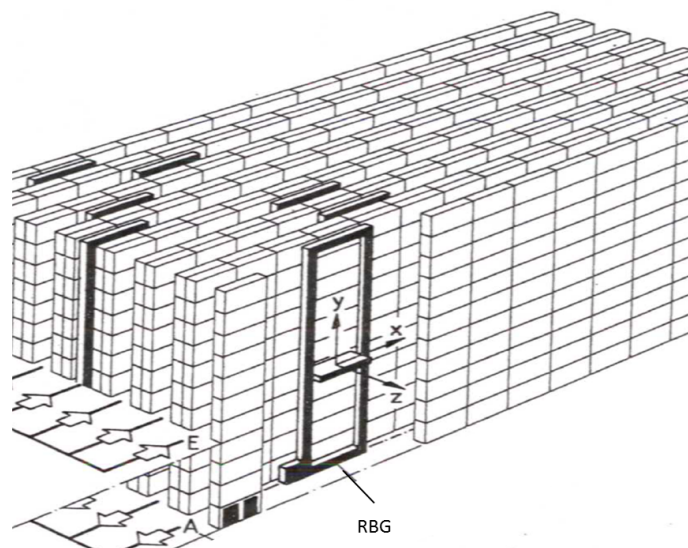


Abbildung 3.1.: Lager mit Regalbediengerät und Ein- und Auslagerungspunkt  
(FEM 9.851 2003, Seite 1)

Die Einteilung eines RBG kann, unabhängig von den zu transportierenden Massen, in die folgenden 6 Klassen vorgenommen werden: (FEM 9.101 1997)

1. *Einleitung der senkrechten Hauptreaktionskräfte:* Hierbei wird zwischen einer hängenden, oben laufenden oder unten laufenden Ausführung bzw. einer Mischform unterschieden (Abbildung 3.2). Bei dem heutigen Stand der Technik hat sich die unten laufende Variante etabliert. Dabei dient die obere Schnittstelle lediglich der Führung des Mastes. Dies hat seinen Grund in der Kraftableitung. Werden die Kräfte oben eingeleitet, wie es bei der hängenden bzw. oben laufenden Variante der Fall ist, muss die Regalkonstruktion entsprechend massiv ausgelegt werden, was wiederum einen direkten Einfluss auf die Regalkonstruktion und -kosten hat. Es ist wirtschaftlicher, die Kräfte über den Mast und Mastfuß in den Boden einzuleiten. Neueste Geräte haben an der oberen Führung einen zusätzlichen Antrieb. Dieser dient dazu, ein Pendeln des Mastes bei positiver und negativer Verzögerung zu verhindern und somit die Spielzeit zu verringern. Dieser Ansatz ist jedoch keine Mischform, da keine lotrechten Hauptreaktionskräfte über den Mastkopf in das Regal eingeleitet werden.
2. *Anzahl der Maste:* Es Ein-Mast-Geräte, Zwei-Mast-Geräte und Mehr-Mast-Geräte. Welche Bauweise zum Einsatz kommt, ist von den zu transportierenden Gütern und Lasten abhängig. Die Zweimastbauweise bietet nach (Koether 2007) eine größere Steifigkeit als die Einmastbauweise, hat allerdings auch einen größeren Platzbedarf.

Sie ist folglich eher für sehr große Lasten geeignet<sup>1</sup>. Bei RBG für automatische Kleinteilelager hat sich die Ein-Mast-Bauweise durchgesetzt, da sich hier die zu transportierenden Massen im Bereich von ca. 50 kg bis 300 kg bewegen. Mehr-Mast-Geräte werden nur in Sonderfällen eingesetzt. Abbildung 3.1 zeigt ein Zwei-Mast-Gerät, Abbildung 3.2 zeigt drei Ein-Mast-Geräte.

3. *Bedienperson im Arbeitsbereich:* Es wird zwischen mit oder ohne mitgeführter Bedienperson unterschieden. Ohne Bedienperson agiert das RBG mit mechanischen Lastaufnahmemittel vollautomatisch. Ist eine Bedienperson mit eingeplant, so kann diese zum einen das RBG steuern (manuell) oder bei einem halbautomatischen Gerät lediglich die Entnahme von Gütern aus den Lagerfächern durchführen. In diesem Fall bewegt sich das RBG automatisch zu den entsprechenden Lagerfächern.
4. *Arbeitsweise:* Bei der Arbeitsweise wird zwischen automatisch, halbautomatisch und handbetätigt unterschieden. Die automatische Variante ist ohne Bedienperson, bei der halbautomatischen bzw. handbetätigten Variante muss eine Bedienperson mitgeführt werden.
5. *Art der benötigten Energie:* Die möglichen Energiearten zum Bewegen des RBG sind elektrisch, hydraulisch oder Druckluft. Heute hat sich fast ausnahmslos der elektrische Antrieb durchgesetzt, da hier die Energieübertragung am effektivsten durchgeführt werden kann.
6. *Antriebsart:* Bei der Antriebsart wird zwischen einer gesteuerten (offener Steuerkreis) oder einer geregelten (geschlossener Regelkreis) unterschieden.

## 3.2. Baugruppen eines Regalbediengerätes

In Anlehnung an (FEM 9.101 1997) und (DIN EN 528 2009) können die nachfolgenden Baugruppen identifiziert werden (siehe auch Abbildung 3.3):

- *Mastkopf:* Der Mastkopf dient zur Führung des Regalbediengerätes am oberen Ende. Diese Führung stellt sicher, dass das Regalbediengerät nicht in Gassenlängs- oder Gassenquerrichtung kippt. Des weiteren ist im Mastkopf auch die Umlenkung der Hubeinrichtung des Hubwagens integriert. Dies sind entweder Seile oder Zahnriemen. Je nach Modell und gewünschter Dynamik kann der Mastkopf auch angetrieben sein, um insbesondere das Schwingen des Mastes zu minimieren und somit die Spielzeit zu reduzieren.
- *Mast:* Die primäre Aufgabe des Mastes ist die Führung des Hubwagens. Dazu ist der Mast entlang des Regals vertikal ausgerichtet. Seine fixen Punkte hat der Mast im Mastkopf und im Fahrwerk. Je nach Modell und Gewichtsklasse gibt es

---

<sup>1</sup>Z.B. zwei Lastaufnahmemittel für Paletten mit doppeltiefer Lagerung im Regal.

### 3. Regalbediengeräte

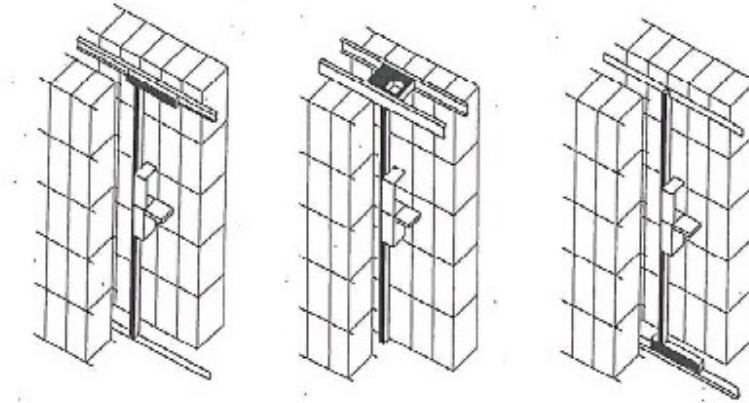


Abbildung 3.2.: Klassifizierung eines RBG, Einleitung der senkrechten Hauptreaktionskräfte: links: hängend; mitte: oben laufend; rechts: unten laufend (FEM 9.754 1988)

ein oder zwei Masten, die den Hubwagen führen. Die Anzahl der Masten ist von den zu transportierenden Gütern und Lasten abhängig (siehe Kapitel 3.1).

- *Fahrwerk*: Das Fahrwerk bewegt sich in x-Richtung und fixiert den Mast. Es ist auch für die Kraftableitung in die Fahrschiene, welche am Boden fixiert ist, zuständig. Am Fahrwerk ist ebenfalls der Fahrtrieb angebracht, der für die Bewegung in x-Richtung verantwortlich ist.
- *Fahrtrieb*: Der Fahrtrieb treibt das RBG in x-Richtung an. Als weitere Antriebe sind der Hubantrieb (für den Hubwagen) sowie ein Antrieb für das Lastaufnahmemittel vorhanden.
- *Hubwerk*: Die Aufgabe des Hubwerkes ist die Fixierung und Führung des Lastaufnahmemittels. Das Hubwerk kann mit oder ohne Fahrstand zum Mitführen von Personal ausgerüstet sein. Der Hubwagen wird am Mast (meist Rollenführung) geführt und über Zugmittel (Drahtseile, Ketten oder Riemen) gehalten bzw. bewegt. Sonderbauformen sind hydraulische Antriebe, Spindelantriebe oder Zahnstangenantriebe.
- *Lastaufnahmemittel*: Das Lastaufnahmemittel (LAM) ist die Schnittstelle zwischen zu transportierender Last und RBG. Es führt seine Bewegungen in z-Richtung aus und ist für die Aufnahme bzw. Abgabe sowie die Fixierung der Last verantwortlich. Nach (DIN EN 528 2009) muss das Lastaufnahmemittel so konstruiert sein, dass die bestimmungsgemäß aufgenommene Last während des Normalbetriebes eine stabile Lage behält. Weiter ist sicherzustellen, dass die Last nicht über die zugewiesene Kontur hinaus steht.

### 3.2. Baugruppen eines Regalbediengerätes

Abbildung 3.3 zeigt schematisch ein Einmast-RBG mit den 4 Hauptbaugruppen Hubwagen (a), Mast (b), Fahrwerk (c) und Mastkopf (d). In Kapitel 5 werden die Baugruppen nochmals aufgegriffen, um das geeignete Bauteil zur Substitution zu bestimmen.

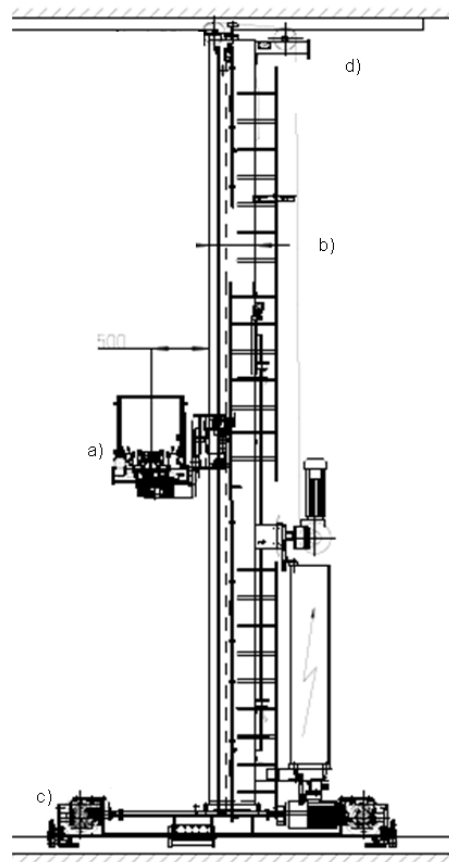


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung eines Regalbediengerätes (RBG) mit a) Hubwagen; b) Mast; c) Fahrwerk; d) Mastkopf  
(FEM 9.831 1995)



## 4. Werkstoffe

In der Vergangenheit wurden die Zeitalter nach dem Einsatz des Werkstoffs durch die Menschheit benannt, z.B. die Steinzeit (>10.000 v. Chr.), die Bronzezeit (4000 - 1000 v. Chr.) oder die Eisenzeit (1000 v. Chr. - 1620 n. Chr.). Die heutige Zeit lässt sich nur schwer durch ein einziges Material beschreiben. Es ist nicht die Zeit eines Materials, es ist die Zeit einer großen Auswahl an verschiedensten Materialien in Verbindung mit einer entsprechenden Konstruktion. Dem Ingenieur stehen nach (Ashby 2005, Seite 2f) bis zu 120.000 Materialien zur Verfügung.

Der Einsatz eines neuen Werkstoffs ist mit erhöhtem Risiko verbunden. Zum einen für das Produkt selbst, da die bestehenden Anforderungen auf einen neuen Werkstoff übertragen werden müssen. Weiter besteht auch für den Konstrukteur ein erhöhtes Risiko keine geeignete Lösung zu finden. Dies wird nicht selten gescheut, was sich daran erkennen lässt, dass in der Regel bei Neu- und Weiterentwicklungen die Werkstofffamilie beibehalten wird. Grundlegende Neuerungen im Bereich des Materialeinsatzes sind dann nur schwer umzusetzen. In Kapitel 1.2 sind bereits die fünf Hauptbeweggründe für den Einsatz neuer Materialien genannt worden. Neben diesen Hauptmotiven nennt (Reuter 2007, Seite 21f) weitere Motive, die für eine Werkstoffänderung verantwortlich sein können:

- *Ästhetische Anforderungen* der Kunden in z.B. verschiedenen Regionen der Welt
- *Verantwortungsbewusstsein* gegenüber der Umwelt
- *Geänderte Geschäftsstrategie* bzw. angepasstes Produktportfolio; neue Produkt-trends
- *Neue Produktions- und Prüfverfahren*, die eine erhöhte Wirtschaftlichkeit versprechen
- *Erhöhte Rohstoffpreise* erfordern den Einsatz neuer Materialien

Im weiteren Verlauf wird auf die wichtigsten Werkstoffe für die Fördertechnik bzw. die RBG eingegangen.

### 4.1. Allgemeine Werkstoffe

#### Stahl

Stähle zählen bis heute zu den wichtigsten Konstruktionswerkstoffen des Maschinenbaus. Die Vorteile einer Stahlkonstruktion sind nach (Klein 2009) der günstige Preis,

#### 4. Werkstoffe

eine breite Verfügbarkeit an Halbzeugen und eine große Vielfalt an mechanischen und physikalischen Eigenschaften. Nachteilig ist hier die relativ hohe Dichte. Dies führt zu schweren Konstruktionen und dadurch zu einem hohen Primärenergieverbrauch.

Stähle sind Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, die ohne weitere Nachbehandlung schmiedbar sind und einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 2,1 % aufweisen. “Stahl ist zäh, immer warm umformbar und bei niedrigem Kohlenstoffgehalt auch kalt umformbar. Durch Wärmebehandlung (...) lässt sich seine Festigkeit erheblich vergrößern, allerdings nimmt seine Verformbarkeit dabei ab (...).” (Bargel, Hilbrans, and Schulze 2008, Seite 139f)

Weiter kann eine Legierung des Stahls dessen Eigenschaften stark beeinflussen. Legieren ist das Hinzufügen bestimmter Elemente, wie z.B. Aluminium oder Kupfer, um gewünschte Eigenschaften zu erzeugen. Beispielsweise kann durch Zugabe von Kohlenstoff, Stickstoff oder Phosphor die Festigkeit und Härte wesentlich beeinflusst werden (Klein 2009).

### **Aluminium**

Aluminium kann als wichtigster Werkstoff des metallischen Leichtbaus bei RBG gesehen werden. Besondere Vorteile des Aluminiums sind im Vergleich zu Stahl die niedrigere Dichte, vergleichbare Festigkeitswerte und die hohe Zähigkeit. Auch beim Aluminium ist eine Eigenschaftsmodifikation möglich. Durch Legieren, spezielles Aushärten oder Kaltverfestigen können die Eigenschaften gezielt geändert werden. Z.B. kann durch eine Wärmebehandlung (Aushärtung) die Festigkeit signifikant gesteigert werden (Klein 2009).

### **Kunststoffe**

Nach (Weissbach 2012, Seite 241) sind die Vorzüge von Kunststoffen (Polymeren) “...die Kombination aus Korrosionsbeständigkeit und geringer Dichte verbunden mit kostengünstiger Herstellung von Bauteilen mit großer Gestaltungsfreiheit.” Neuere Polymere und Faserverbunde haben im Vergleich zu Polymeren aus dem letzten Jahrhundert eine höhere Festigkeit und Steifigkeit, so dass sie als Leichtbauwerkstoffe mit Al- und Mg-Legierungen konkurrieren.

Polymere lassen sich in drei Bereiche einteilen. Diese Einteilung basiert auf der Molekülstruktur, welche die Haupteigenschaften festlegt. (Weissbach 2012, Seite 242)

- Thermoplaste (Plastomere): Ketten- oder Fadenmoleküle, plastisch verformbar und schweißbar
- Elaste (Elastomere): Kettenmoleküle mit Vernetzungen, gummielastisch, hohe Rückstelleigenschaften
- Duroplaste (Duromere): Raumnetzmoleküle, unschmelzbar, fast unlöslich, hart



Polymere sind auch aufgrund ihrer weniger dichten Molekülpackung leichter als Metalle. Weiter sind Polymere biegeweicher, d.h. der E-Modul ( $E = 500 - 3.000 \frac{N}{mm^2}$ ) ist gering. Sie besitzen eine 5 bis 15fach größere Wärmedehnung als z.B. Stahl. Polymere neigen unter Belastung zu erhöhtem Kriechen und folglich einer bleibenden Formänderung. Dies hat seinen Grund im Fehlen eines Kristallgitters. Die im Vergleich zum Metall größeren Molekülabstände ermöglichen ein Verschieben der Kettenmoleküle. Durch gezieltes Verarbeiten und Kombination verschiedener Polymere oder auch durch Kombination von Polymeren mit anderen Materialien lassen sich diese Eigenschaften beeinflussen und auch gezielt verändern. Dies wird unter anderem in sog. Faser-Kunststoff-Verbunden deutlich (siehe Kapitel 4.2) (Weissbach 2012, Seite 242f), (Klein 2009, Seite 54). Der Kunststoff an sich gilt, aufgrund seiner Eigenschaften, nicht als bedeutender Konstruktionswerkstoff für tragende Strukturbauteile.

## 4.2. Faser-Kunststoff-Verbund

“In Jahrmillionen langer Evolution hat die Natur das Prinzip, Kräfte durch hochfeste Fasern aufnehmen zu lassen, als bestgeeignetes Leichtbauprinzip herausgebildet.” (Schürmann 2007, Seite 1) Ein faserverstärkter Verbundwerkstoff ist im Grunde eine von der Natur hervorgebrachte Konstruktionsmethode. “Neben dem Leichtbauprinzip, Kräfte von Fasern aufnehmen zu lassen, liegt den Faserverbundwerkstoffen ein weiteres wichtiges Prinzip zugrunde: Verschiedene Werkstoffe werden miteinander kombiniert, um Teil-Mängel der Einzelstoffe in der Werkstoffkombination auszugleichen.” (Schürmann 2007, Seite 2) Allgemein werden die Faserverbundwerkstoffe den Werkstoffen zugeordnet. Streng genommen stellen sie jedoch in erster Linie eine Bauweise bzw. ein Konstruktionsprinzip dar. Heute versteht man unter einem Faserverbundwerkstoff einen Verbund aus hochfesten Fasern (meist Glas- oder Kohlenstofffasern) und einem Kunststoff. Daneben gibt es eine Reihe anderer Faserverbundwerkstoffe, wie z.B. faserverstärkte Metalle (metall matrix composites, MMC) oder Keramiken (Bergmann 1992), (Weissbach 2012).

In einem Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) treten die unterschiedlichen Eigenschaften von Fasern und Matrix auf. Folglich soll auch die Bezeichnung “Faser-Kunststoff-Verbund” im weiteren Verlauf der Arbeit gewählt werden. Die alternative Bezeichnung “faserverstärkter Kunststoff” suggeriert eine dominierende Aufgabe der Faser zur Verstärkung. Dies kann in einigen Fällen irreführend sein bzw. wird der Matrix nicht gerecht<sup>1</sup> (Schürmann 2007). Nachfolgend soll auf die wichtigsten Faser- und Matrixarten eingegangen werden.

### 4.2.1. Fasern

Die Fasern übernehmen die am Bauteil liegenden Zugbeanspruchungen. Nach (Schürmann 2007) haben bei hochbeanspruchten Fasern nur die Glas-, Kohlenstoff- und Ara-

---

<sup>1</sup>In bestimmten Anwendungsfällen ist der Schutz des Bauteils vor äußeren Umwelteinflüssen durch die Matrix als gleichwertig wie die Stabilität gegen mechanische Belastung anzusehen.

## 4. Werkstoffe

midfasern einen nennenswerten Marktanteil erreicht. Im weiteren Verlauf werden diese drei Faserarten näher betrachtet.

### Glasfasern

Glasfasern sind anorganische Fasern und besitzen eine hohe Festigkeit basierend auf den starken kovalenten Bindungen zwischen Sauerstoff und Silizium. Die Atome im Glas bilden ein dreidimensionales Netzwerk, jedoch mit amorpher Struktur und ohne Orientierung. Folglich besitzt die Faser isotrope Eigenschaften. Die Glasfaser ist im Vergleich zu anderen Fasern günstig. Weitere positive Eigenschaften sind die hohen Längs-Zug- sowie Längs-Druckfestigkeiten und die Eigenschaft, nicht zu brennen. Nachteilig ist der relativ niedrige E-Modul (je nach Variante  $55.000 - 86.000 \frac{N}{mm^2}$ ) (Schürmann 2007).

### Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern besitzen gegenüber Glasfasern einen wesentlich höheren E-Modul (zwischen  $230.000 \frac{N}{mm^2}$  und  $450.000 \frac{N}{mm^2}$ ) und somit auch eine höhere Festigkeit und Steifigkeit. Verantwortlich hierfür sind starke atomare Bindungen. Weitere Vorteile sind die geringe Dichte ( $\rho = 1,8 \frac{g}{cm^3}$ ) und somit das geringe Gewicht. Die Kohlenstofffasern haben ein anisotropes Werkstoffverhalten (der E-Modul ist in Faserquerrichtung im Vergleich zur Faserlängsrichtung um ca. Faktor 10 kleiner). Nachteilig ist das spröde Bruchverhalten sowie der hohe Preis. Jedoch ist es für einen Konstrukteur einfacher, mit Kohlenstofffasern zu konstruieren (im Vergleich zur Glasfaser), da aufgrund der höheren Steifigkeit den Fasern mehr Lasten zugeordnet werden können und dabei die deutlich schwächere Matrix und die Verklebung zwischen Faser und Matrix entlasten (Schürmann 2007).

### Aramidfasern

Aramidfasern (bzw. Polymerfasern) werden als Verstärkungsfasern weniger eingesetzt, da diese selten ein ausgewogenes Eigenschaftsprofil aufweisen. Vorteile sind die sehr geringe Dichte der Faser ( $\rho_f = 1,45 \frac{g}{cm^3}$ ), der hohe E-Modul (je nach Variante von  $67.000 - 130.000 \frac{N}{mm^2}$ ) und die hohe Zähigkeit. Nachteilig sind die geringe Druckfestigkeit, die UV-Abhängigkeit und die bei Langzeitbelastung geringfügige Kriechneigung (Schürmann 2007).

Tabelle 4.1 zeigt einen Überblick über wesentliche Eigenschaften der drei hier genannten Faserarten. Hieraus lässt sich erkennen, dass Kohlenstofffasern vom Grundsatz her die interessantesten Eigenschaften besitzen. Neben den drei am weit verbreitetsten Faserarten gibt es noch die PBO-Fasern, Polyethylenfasern, Naturfasern, Basaltfasern, Quarzfasern, Aluminiumoxidfasern und Siliziumcarbidfasern. Diese spielen jedoch im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle.

	Glasfaser	Kohlenstofffaser	Aramidfaser
E-Modul $E_{\parallel}$ in $\frac{N}{mm^2}$	55.000 - 86.000	230.000 - 450.000	67.000 - 130.000
E-Modul $E_{\perp}$ in $\frac{N}{mm^2}$	73.000	28.000	5.400
G-Modul $G$ in $\frac{N}{mm^2}$	29.920	50.000	1.450
Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$	0,22	0,23	0,32
Zugfestigkeit $R_{\parallel}^+$ in $\frac{N}{mm^2}$	2.400	3.430	2.800
Dichte $\rho$ in $\frac{g}{cm^3}$	2,54	1,74	1,44 - 1,45

Tabelle 4.1.: Eigenschaften der Fasern  
(Schürmann 2007)

### 4.2.2. Matrix

Nach (Schürmann 2007) übernimmt die Matrix in einem Faser-Kunststoff-Verbund unter anderem folgende Aufgaben:

- Fixierung der Fasern in der gewünschten Anordnung
- Überleitung der Kräfte in die Fasern
- Stützen der Fasern gegen Schubknicken
- Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen
- Gewährleistung der Form des Bauteils

Für eine polymere Matrix kommen Duromere, Thermoplaste oder Elastomere zur Anwendung. Wie bei anderen Materialien auch können bei einer Matrix mit verschiedenen Füllstoffen (Legierungen) gezielt die Eigenschaften der Matrix angepasst werden.

#### Duromere

Duromere sind die am häufigsten verbreiteten Matrixsysteme. Sie besitzen einen hohen E-Modul, eine gute thermische Beständigkeit, eine hohe Steifigkeit und sind unproblematisch in der Verarbeitung. Duromere werden als Reaktionsharze bezeichnet, da die endgültige feste Form durch eine Vernetzungsreaktion von multifunktionellen Monomeren entsteht. Weiter weisen Duromere amorphe Eigenschaften auf. Nachteilig ist bei hoher Vernetzungsdichte ein sprödes Werkstoffverhalten sowie eine schlechte Wiederverwertbarkeit (Ashby and Jones 2007).

#### Thermoplaste

Thermoplaste sind thermisch reversibel verformbar. Als Matrix für Faser-Kunststoff-Verbünde eignen sich besonders Polypropylen (PP), Polyester Polybutylenterephthalat (PBT) Polyethylenterephthalat (PET) und Polyamide (PA) (Ashby 2011).

### Elastomere

Unterteilen lassen sich Elastomere in räumlich vernetzte Elastomere und in Thermoplastische Elastomere. Elastomere sind oberhalb der Glasübergangstemperatur (diese liegt in der Regel unter 0°C) dehnfähig. Aufgrund der geringen Steifigkeit und des elastischen Verhaltens eignen sich Elastomere eher selten für hochbelastete Strukturbauteile (Ashby 2011).

### Füllstoffe

Mit Füllstoffen in der Matrix können gezielt Eigenschaften geändert werden. So kann durch Einfügen von entsprechenden Füllstoffen die Matrix verbilligt bzw. gestreckt werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass dadurch auch die Eigenschaften der Matrix positiv als auch negativ verändert werden können (Schürmann 2007).

### 4.2.3. Mechanische Eigenschaften

Die notwendigen mechanischen Anforderungen, welche an den Werkstoff gestellt werden, erfordern in Anlehnung an (Schürmann 2007) ein ausreichend hohes E-Modul, eine hohe Bruchdehnung, eine hohe Risszähigkeit und eine hohe Klebefestigkeit.

- *E-Modul*: In einem Faser-Kunststoff-Verbund übernehmen die Fasern entlang ihrer Körperachse den Hauptteil der von außen angelegten Belastung. Folglich muss die Faser einen wesentlich höheren E-Modul aufweisen und es gilt folgender Zusammenhang:

$$E_F \gg E_M \quad (4.1)$$

Bei faserparalleler Druckbelastung ist jedoch ein hoher Matrix-E-Modul notwendig. Nach (Schürmann 2007) hat sich hier ein E-Modul von  $E_M = 3000 - 4000 \frac{N}{mm^2}$  bewährt.

- *Festigkeit*: Da die Fasern in einem Faser-Kunststoff-Verbund eine Verstärkungsfunktion besitzen, gilt folgender Zusammenhang bzgl. der Festigkeit:

$$R_F > R_M \quad (4.2)$$

- *Bruchdehnung*: Um eine hohe Faserfestigkeit nutzen zu können, sollte die Matrix nicht vor der Faser versagen. Folglich gilt hier folgender Zusammenhang:

$$e_F < e_M \quad (4.3)$$

Grundsätzlich sollte die Matrixbruchdehnung mindestens das doppelte der Faserbruchdehnung aufweisen. Dieser Zusammenhang erklärt sich daraus, dass bei einer zu geringen Matrixbruchdehnung die Zugfestigkeit der Faser nicht genutzt werden kann.

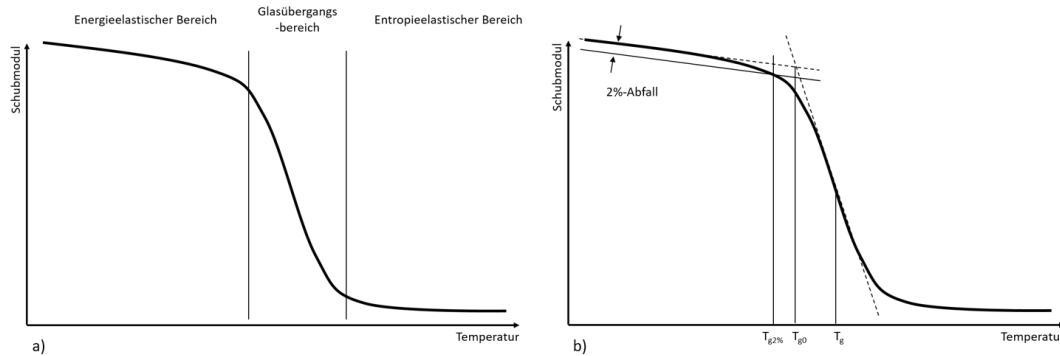


Abbildung 4.1.: Glasübergangsbereich nach (Ehrenstein 2006) und (Schürmann 2007)

#### 4.2.4. Temperatureinfluss

Kunststoffe sind stark temperaturabhängig, hohe Temperaturen können die Eigenschaften verändern. Der sog. Glasübergangsbereich bezeichnet einen Bereich, bei welchem der Kunststoff sprunghaft seine Eigenschaften ändert. Unterhalb dieses Übergangs herrscht energieelastisches Verhalten, oberhalb entropieelastisches Verhalten des Werkstoffes vor. Abbildung 4.1, a) zeigt diesen Zusammenhang auf. Hier ist zu erkennen, dass der Übergang fast sprunghaft erfolgt (Schürmann 2007).

Die Temperatureinsatzgrenzen werden meist durch die Glasübergangstemperatur  $T_g$  bzw. die Steifigkeits-Temperatur-Abhängigkeit bewertet (siehe Abbildung 4.1, b).  $T_g$  kann nach (Schürmann 2007) jedoch nur als Anhaltswert dienen, da hier der Steifigkeitsabfall im Bauteil bereits begonnen hat. Nach (Ehrenstein 2006) bildet die sog. 2%-Grenze eine sinnvolle thermische Einsatzgrenze dar. Dazu wird eine Parallele mit 2%-igen Abstand zum energieelastischen Kurvenverlauf gelegt. Der Schnittpunkt mit der Kurve bestimmt dann  $T_{g2\%}$  (siehe Abbildung 4.1, b). Alternativ kann der Steifigkeitsabfall über Extrapolation bestimmt werden. Hierzu wird der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden (energieelastischer Bereich der Kurve sowie Extrapolation des Steilabfalls) bestimmt, welcher dann  $T_{g0}$  als thermische Einsatzgrenze definiert. Sowohl  $T_{g2\%}$  als auch  $T_{g0}$  können als Beginn der Bauteilerweichung angesehen werden (Ehrenstein 2006; Schürmann 2007) (Ehrenstein 2006; Schürmann 2007).

Bei zunehmender Temperatur, bzw. im Glasübergangsbereich, treten unter anderem folgende Eigenschaftsänderungen auf:

- Der thermische Ausdehnungskoeffizient steigt an.
- Die spezifische Wärmekapazität nimmt zu.
- Die Steifigkeit und die Festigkeit reduzieren sich.
- Die Bruchdehnung nimmt zu.

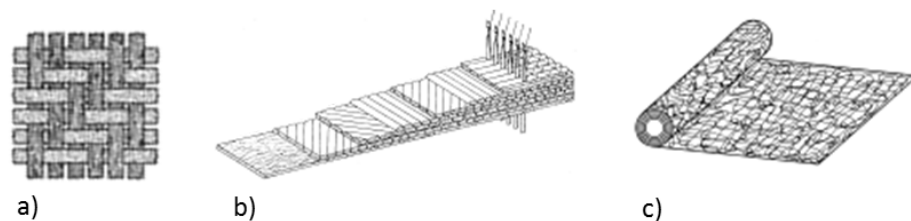


Abbildung 4.2.: Vorgefertigte Halbzeuge: a) Gewebe, b) Multiaxialgelege und c) Matte bzw. Vlies nach (Schürmann 2007)

#### 4.2.5. Herstellverfahren

Bei hoch beanspruchten Faser-Kunststoff-Verbunden kommen fast nur Endlosfasern in unidirektionaler Schicht zum Einsatz. Hierfür eignen sich besonders die Herstellverfahren der Wickeltechnik und der Pultrusion.

Nachfolgende Herstellverfahren lassen eine komplexe Geometrie zu, eignen sich jedoch nicht für FKV mit Endlosfasern:

- Auftragende Methode
- Bulk Molding Compund (BMC)
- Harzguss/Resin Transfer Molding (RTM)
- Vakuumunterstützter Harzguss (Vacuum assisted RTM)

Für verschiedene Anwendungen gibt es Halbzeuge, die in großer Menge hergestellt und je nach Anwendungsfall weiterverarbeitet werden. Dadurch kann der Halbzeughersteller größere Stückzahlen für verschiedene Abnehmer produzieren. Als vorgefertigte Halbzeuge gibt es hauptsächlich Gewebe, Multiaxialgelege und Matten bzw. Vliese, siehe Abbildung 4.2. Bei der Herstellung von Halbzeugen werden nicht nur die Eigenschaften der einzelnen Materialien kombiniert, sondern es treten auch aufgrund der Verlegung Eigenschaften auf, die es zu berücksichtigen gilt. So können z.B. bei der Verlegung als Gewebe Verdrehungen oder Faserkrümmungen aufgrund der häufigen Richtungswechsel entstehen, siehe Abbildung 4.2, a. Dadurch verringert sich die Festigkeit der Faser (Schürmann 2007).

Im Folgenden werden die oben aufgeführten sechs wesentlichen Herstellverfahren für FKV näher erläutert:

- *Wickeln*: Beim Wickeln werden Verstärkungsfasern zu achsensymmetrischen, spiralförmigen Teilen verarbeitet, indem diese auf einen rotierenden Körper aufgewickelt

werden. Das Wickeln wird so lange durchgeführt, bis die entsprechende Materialdicke erreicht ist. Das Wickelverfahren eignet sich zum Herstellen homogener Bauteile. Allerdings ist aufgrund der Technik die Länge der Bauteile beschränkt. Weiter können keine komplexen Bauteilformen realisiert werden. (siehe Abbildung A.1 in Anhang A) (Ashby 2011)

- *Pultrusion*: Bei der Pultrusion (oder Strangziehen) werden Fasern durch eine Reihe von Ziehwerkzeugen mit einer vorgegebenen Bauteilgeometrie gezogen. In diesen Ziehwerkzeugen wird auch die Matrix zugegeben. Die letzte dieser Formen ist beheizt, was ein Aushärten des FKV zur Folge hat. Hierbei können endlos lange Bauteile hergestellt und anschließend entsprechend gekürzt werden. Das Pultrusionsverfahren eignet sich für die Herstellung homogener Bauteile und im Querschnitt komplexer Formen in unterschiedlichen Längen. Bei längeren Bauteilen oder hoher Stückzahl ist dieses Verfahren sehr kostengünstig. (siehe Abbildung A.2 in Anhang A) (Ashby 2011)
- *Auftragende Methode*: In eine Form (entsprechend der Bauteilgeometrie) werden die Fasern und die Matrix entweder per Hand, automatisiert über Verlegerobotern oder im Sprühverfahren aufgetragen. Bei der auftragenden Methode können an gezielten Stellen Lagen unterschiedlich gelegt und unterschiedliche Dicken realisiert werden. Nachteilig sind bei höheren Stückzahlen und homogenen Bauteilen die relativ hohen Kosten. (siehe Abbildung A.3 in Anhang A) (Ashby 2011)
- *Bulk Molding Compound (BMC)*: Das BMC ist ein kostengünstiges Verfahren für die Massenproduktion von kleinen und mittleren Bauteilgrößen. Ein bereits vorgefertigter Press-/ Spritzpresswerkstoff (bestehend aus Harz, Füllstoffen, Fasern, Katalysator und je nach Anwendung Additive) wird in eine Vorform eingegeben. Durch einen entsprechend geformten Stempel wird der Werkstoff in Form gepresst. Durch Druck (zwischen 0,5 und 15 MPa) und Erhitzen (160 bis 180°C) der Form wird das Harz ausgehärtet. (siehe Abbildung A.4 in Anhang A) (Ashby 2011)
- *Harzguss/Resin Transfer Molding RTM*: Mittels Harzgiessen können komplexe Bauteilgeometrien realisiert werden. In einer Form werden die Verstärkungen (z.B. Gewebe) eingebettet, anschließend wird die Form verschlossen. Danach wird ein wärmeaushärtendes Harz in die Form eingegeben und wie beim BMC-Verfahren mittels Druck und Erhitzen ausgehärtet. (siehe Abbildung A.5 in Anhang A) (Ashby 2011)
- *Vakuumunterstützter Harzguss (Vacuum assisted RTM)*: Mittels dieses Verfahrens können große und komplizierte Geometrien aus Verbundwerkstoffen hergestellt werden. Verstärkungen (z.B. Multiaxialgelege) werden in einer Matrize platziert. Anschließend wird eine abziehbare Schicht darübergelegt. Durch eine Vakuumpumpe wird die Luft unterhalb der Schicht abgesaugt und gleichzeitig das wärmeaushärtende Harz eingezogen. Bei gewissem Druck und Erhitzen wird der Verbundwerkstoff ausgehärtet. (siehe Abbildung A.6 in Anhang A) (Ashby 2011)

## 4. Werkstoffe

Das Herstellen von Bauteilen mittels der unterschiedlichen Verfahren hat auch unterschiedliche Kosten zur Folge. Hierauf wird in Kapitel 5 näher eingegangen.

### 4.3. Zusammenfassung

Änderungen der Werkstoffe bzw. der Werkstofffamilie bedeuten Risiko und Chance zugleich. Einerseits kann eine Konstruktion mit neuem Werkstoff die technischen Anforderungen nicht erfüllen. Andererseits können durch neue Werkstoffe Grenzen z.B. bezüglich des Leichtbaus verschoben werden. Die hier vorgestellten Werkstoffe Stahl und Aluminium bilden die konstruktiven Hauptwerkstoffe bei heutigen RBG. Der Kunststoff wird bei RBG's lediglich zur Verkleidung von sensiblen technischen Systemen (z.B. elektrische Steuerungen) eingesetzt. Eine Ausnahme bildet hier das Kleinteile-RBG Cheetha<sup>2</sup>. Hier ist die Bauweise an eine Fachwerkkonstruktion angelehnt. Gerade Streben sind aus faserverstärktem Kunststoff, sämtliche Eckverbindungen sind aus metallischem Werkstoff hergestellt. Hier wurden erstmals lasttragende Bauteile des Mastes eines RBG in FVK ausgeführt. Die Eckverbindungen sind jedoch weiterhin aus Stahl bzw. Aluminium. Somit ist auch hier weiteres Potential zur Gewichtseinsparung vorhanden. bei dieser Konstruktion Leichtbaupotential gegeben.

Der in Kapitel 4.2 vorgestellte Faser-Kunststoff-Verbund zeigt durch die Kombination von verschiedenen Materialien großes Potential bzgl. der geeigneten Eigenschaften für den Einsatz bei Strukturbauteilen eines RBG.

---

<sup>2</sup>Regalbediengerät des Unternehmens Gebhardt Fördertechnik GmbH, 2015.



# 5. Definition der Anforderungen

Aufbauend auf den bisher dargestellten Grundlagen sollen nun Anforderungen (Randbedingungen und Zielgrößen, vgl. Kapitel 2) definiert werden.

Die bereits in Kapitel 1 beschriebene Problematik des Masse zu Nutzlastverhältnisses beeinflusst die Frage des Energieverbrauchs zum Transportieren einer Last. Die Herausforderung besteht darin, die Masse eines RBG zu reduzieren, um den benötigten Energieverbrauch und die Betriebskosten zu senken. Weiter kann bei reduzierter Masse und gleicher Leistung auch die Dynamik und der Durchsatz erhöht werden. Nicht außer acht gelassen werden darf auch der Umweltaspekt. Ein reduzierter Energieverbrauch bedeutet eine Steigerung der Umweltverträglichkeit.

## 5.1. Regalbediengerätetyp und Anwendungsfall

Wie in Kapitel 3 beschrieben, gibt es zwei Hauptausführungen von RBG, Geräte für den Standard-Palettentransport bzw. Geräte für automatische Kleinteilelager. Kleinteile-RBG dienen häufig auch als Nachschublager für Kommissionierarbeitsplätze. Hier ist eine hohe Dynamik gefordert und folglich durch hohe Beschleunigungsvorgänge auch ein im Verhältnis hoher Energieverbrauch. Daneben dient ein automatisiertes Palettenlager in der Regel als Puffer über eine gewisse Zeitspanne (bis hin zu mehreren Monaten) und somit ist hier die geforderte Dynamik geringer. Aus diesen Gründen wird für die Betrachtung der Gewichtsreduzierung ein Kleinteile-RBG ausgewählt.

### 5.1.1. Technische Daten des gewählten RBG

Da die Darstellung Modellcharakter besitzt, kann hier ein vereinfachter Anwendungsfall für die Geräteklasse des automatische Kleinteilelager-RBG definiert werden. Folgende willkürlich getroffenen Annahmen beruhen auf Basis verschiedener Industrieprojekte:

- Die Einlagerung in das Regal erfolgt einfachtief
- Das RBG besitzt die Aufnahmemöglichkeit für 1 Behälter
- Die Behältermaße betragen 400 x 600 mm
- Die max. Nutzlast beträgt 100 kg
- Es ist kein mitfahrender Bedienstand vorgesehen
- Die Höhe der Regalwand beträgt 17 Meter

## 5. Definition der Anforderungen

	Wert
Höhe des RBG	17 m
Länge der Regalgasse	28,3 m
Beschleunigung in x	$1,5 \frac{m}{s^2}$
Geschwindigkeit in x	$5 \frac{m}{s}$
Beschleunigung in y	$1,5 \frac{m}{s^2}$
Geschwindigkeit in y	$3 \frac{m}{s}$

Tabelle 5.1.: Technische Daten RBG

- Der Wandparameter<sup>1</sup> soll ca. 1 betragen
- Es wird kein Reinraumbetrieb vorgesehen
- Die Umgebungstemperatur beträgt ca. 20°C
- Die relative Luftfeuchte beträgt ca. 65%
- Es ist ein RBG pro Gasse vorgesehen
- Ein Gassenwechsel soll nicht möglich sein

In Kapitel 3 ist der grundsätzliche Aufbau eines RBG dargestellt. Tabelle 5.1 zeigt die Leistungsdaten des beispielhaft definierten RBG, Tabelle 5.2 listet die einzelnen Bauteile mit den dazugehörigen Massen auf. Für die Auslegung nach maximal auftretenden Kräften sind abhängig vom Bauteil jedoch nicht diese Leistungsdaten maßgeblich. Für Mast und Fahrwerk ist die sog. Pufferfahrt relevant, da hier die auf die Bauteile wirkenden größten Kräfte auftreten. Die Pufferfahrt ist ein Notstopp des RBG, welches es am Ende einer Gasse aus Höchstgeschwindigkeit zum Stillstand abbremst. Dieser Notstopp wird mittels hydraulischer Zylinder, die am Ende einer Gasse angebracht sind, realisiert. Nach (DIN 15350 1992) muss dieser Puffer eine Verzögerung von  $a_P = 10 \frac{m}{s^2}$  sicherstellen.

### 5.1.2. Bestimmung des Bauteils zur Substitution

Grundsätzlich kann jedes Teil des RBG zur Substitution geeignet sein. Um die aufgeworfene Frage aus Kapitel 1.3 beantworten zu können, soll hier eine Hauptbaugruppe ausgewählt werden. Im besonderen Fokus stehen die bewegten Teile mit den größten Massenanteilen des RBG, da deren Massen maßgeblich einen Einfluss auf die Beschleunigung besitzen. Des Weiteren führt ein RBG eine Bewegung in drei Richtungsachsen aus (vergleiche hierzu Abbildung 3.1). Folgende Aufstellung fasst dies für die einzelnen Hauptbaugruppen zusammen (die Antriebstechnik wird hierbei nicht berücksichtigt):

---

<sup>1</sup>Der Wandparameter beschreibt das Verhältnis der Fahrgeschwindigkeit des RBG zur Regalausdehnung in horizontaler und vertikaler Richtung (Arnold and Furmans 2009).

Baugruppe	Masse [kg]
Mastkopf	30
Mast (17 Meter)	1.650
Fahrwerk	200
Hubwerk	300
Lastaufnahmemittel	35
Last	100
Fahrtrieb	100
sonstiges	250
Gesamtmasse	2.665

Tabelle 5.2.: Massenaufteilung eines AKL-RBG

- *Mastkopf*: Der Mastkopf wird durch den Fahrtrieb mit dem Fahrwerk und dem Mast als Übertragungsglieder in x-Richtung bewegt.
- *Mast*: Der Mast wird durch den Fahrtrieb mit dem Fahrwerk als Übertragungsglied in x-Richtung bewegt.
- *Hubwerk*: Das Hubwerk wird durch den Fahrtrieb mit dem Fahrwerk und dem Mast als Übertragungsglieder in x-Richtung bewegt. Des weiteren wird das Hubwerk durch den Hubtrieb in y-Richtung bewegt.
- *LAM*: Das LAM ist am Hubwerk angebracht und führt folglich die selben Bewegungen aus wie das Hubwerk. Zusätzlich fährt das LAM noch in z-Richtung aus.
- *Fahrwerk*: Das Fahrwerk wird durch den Fahrtrieb angetrieben und bewegt sich in x-Richtung.

Der Mast als größtes und über die Höhe gesehen homogenes Bauteil scheint sich für eine Untersuchung zu eignen. Hier können große Potentiale zur Gewichtsersparnis erzielt werden. Weiter ist durch die Homogenität des Bauteils die Herstellung durch Pultrusionsprofile relativ einfach. Es sind jedoch auch die Bauteile interessant, welche sich in der Vertikalen (y-Richtung) bewegen, also Hubwerk und LAM. Interessant ist die genauere Betrachtung dieser Bauteile auch deswegen, da zur Ausführung der Vertikalbewegung die aufzubringende Energie im Verhältnis zur horizontalen Bewegung höher ist.

## Auswahl des Bauteils

In Anlehnung an eine ABC-Analyse nach (Reuter 2007, Seite 240f) können die Bauteile, welche sich besonders zur Substitution eignen, identifiziert werden. Weiter kann auch eine Klassifizierung der Bauteile erreicht werden. Hierzu werden in einem ersten Schritt Kriterien definiert, nach welchen die Auswahl erfolgen soll. Diese sind:

- Potential Energieeinsparung aufgrund von Massenreduktion

## 5. Definition der Anforderungen

- Potential zur Wirtschaftlichkeit in der Herstellung

Die Hauptbaugruppen des RBG werden nun mittels der Kriterien analysiert und bezüglich deren Potential in eine Reihenfolge gebracht.

### Potential Energieeinsparung aufgrund von Massenreduktion

Der Mastkopf führt die gleiche Bewegung wie der Mast aus und besitzt ein geringeres Gewicht, folglich ist beim Mast ein höheres Potential zu erwarten. Das selbe gilt für das Fahrwerk. Das Hubwerk besitzt im Vergleich zum Mast ein geringeres Gewicht, jedoch führt das Hubwerk neben der horizontalen Bewegung des Mastes auch eine vertikale Bewegung aus.

Um das geeignete Bauteil auswählen zu können, muss die Arbeit bestimmt werden, die für die Bewegung des jeweiligen Bauteils aufgebracht werden muss. Hierzu werden in Anlehnung an (Gross 2012) die Gleichungen 5.1 bis 5.4 eingeführt.

$$F = m \cdot a \quad (5.1)$$

$$F_R = F \cdot c_r \quad (5.2)$$

$$s_a = 0,5 \cdot a \cdot t_a^2 \quad (5.3)$$

$$W = F \cdot s \triangleq F_R \cdot s \quad (5.4)$$

Tabellen 5.3 und 5.4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen. Als Ergebnis ist die benötigte Arbeit für den Hubwagen  $W = 29.013,23 Nm$  und für den Mast  $W = 37.570,59 Nm$ . Hier ist zu erkennen, dass für die Bewegungen des Hubwagens weniger Energie benötigt wird als für den Mast. Folglich ist hier beim Mast das Größere Einsparpotential zu vermuten.

Das LAM führt in alle drei Bewegungsrichtungen Bewegungen aus. Jedoch ist auf Basis des Gewichts des LAM zu erkennen, dass hier kein größeres Potential vorhanden ist. Tabelle 5.5, Spalte a gibt somit die Wichtigkeit in Bezug auf die Energieeinsparung aufgrund von Massenreduktion an.

### Potential Wirtschaftlichkeit Herstellung

Die Wirtschaftlichkeit der Herstellung richtet sich nach der Komplexität der Bauteile. Hier ist der Mastkopf, der Mast und das Hubwerk von geringer Komplexität als das Fahrwerk oder das Lastaufnahmemittel. Die Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden ist in Kapitel 4.2.5 bereits betrachtet worden. Hier hat sich gezeigt, dass das Pultrusionsverfahren bei längeren und im Querschnitt komplexen, aber über die Länge homogenen

Einheit	Hubwagen (y-Richtung) Beschleunigung	Hubwagen (y-Richtung) konstante Fahrt	Hubwagen (x-Richtung) Beschleunigung	Hubwagen (x-Richtung) konstante Fahrt
$m$	$300 \text{ kg}$	$300 \text{ kg}$	$300 \text{ kg}$	$300 \text{ kg}$
$a$	$2,5 \frac{m}{s^2}$	–	$4 \frac{m}{s^2}$	–
$a_{\text{Erdbeschleunigung}}$	$9,81 \frac{m}{s^2}$	$9,81 \frac{m}{s^2}$	–	$9,81 \frac{m}{s^2}$
$a_g$	$12,31 \frac{m}{s^2}$	–	–	–
$c_r$	–	–	0,01	0,01
$t$	$1 \text{ s}$	$2,4 \text{ s}$	$1,625 \text{ s}$	$1,775 \text{ s}$
$s$	$1,25 \text{ m}$	$6 \text{ m}$	$5,28 \text{ m}$	$11,54 \text{ m}$
$F$	$3.693 \text{ N}$	$2.943 \text{ N}$	–	–
$F_R$	–	–	$1.212 \text{ N}$	$29,43 \text{ N}$
$W$	$4.616,25 \text{ Nm}$	$17.658 \text{ Nm}$	$6.399,36 \text{ Nm}$	$339,62 \text{ Nm}$

Tabelle 5.3.: Benötigte Kraft und Arbeit zum Bewegen des Hubwagens

Einheit	Mast (x-Richtung) Beschleunigung	Mast (x-Richtung) konstante Fahrt
$m$	$1.650 \text{ kg}$	$1.650 \text{ kg}$
$a$	$4 \frac{m}{s^2}$	–
$g$	–	$9,81 \frac{m}{s^2}$
$v$	–	$6,5 \frac{m}{s}$
$c_r$	0,01	0,01
$t$	$1,625 \text{ s}$	$1,775 \text{ s}$
$s$	$5,28 \text{ m}$	$11,54 \text{ m}$
$F_R$	$6761,87 \text{ N}$	$161,87 \text{ N}$
$W$	$35.702,67 \text{ Nm}$	$1.867,92 \text{ Nm}$

Tabelle 5.4.: Benötigte Kraft und Arbeit zum Bewegen des Mastes

## 5. Definition der Anforderungen

Bauteilen am günstigsten ist. Auf Basis der Hauptbaugruppen eignet sich nur der Mast für die Herstellung mittels der Pultrusion. Alle weiteren Bauteile sollten aufgrund ihrer Geometrie mit einem anderen Verfahren hergestellt werden. Nachfolgend wird eine Einschätzung über die mögliche Herstellungsart der einzelnen Baugruppen gegeben. Des Weiteren erfolgt eine Kostenbewertung.

- *Mastkopf*: Da der Mastkopf eine eher komplexe Geometrie aufweist, eignet sich hierfür z. B. das Vacuum RTM Verfahren. Dadurch ist es möglich, vorab die Form des Mastkopfes abzubilden und durch das Einsaugen des Harzes die Festigkeit herzustellen.
- *Mast*: Wie bereits oben erwähnt, eignet sich für den Mast als Herstellungsverfahren die Pultrusion.
- *Hubwerk*: Das Hubwerk weist aufgrund seiner Grundstruktur eine, im Vergleich zu Mastkopf und Fahrwerk, einfachere Geometrie auf. Da hier meist eine rechteckige Konstruktion (Führung am Mast und Fixierung des LAM) umgesetzt wird, scheidet das Pultrusionsverfahren aus. Da aufgrund der Belastungsart Endlosfasern notwendig sind, eignen sich als mögliche Herstellungsarten das RTM Verfahren, das Normpressen oder das Hybridverfahren.
- *LAM*: Im Gegensatz zu den restlichen Baugruppen besteht das Lastaufnahmemittel aus mehreren bewegten Teilen. Diese müssen jeweils separat hergestellt und anschließend montiert werden. Somit ist es nicht möglich, für das LAM ein einzelnes Herstellungsverfahren auszuwählen. Des Weiteren ist durch den zusätzlichen Montageaufwand das Potential der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den anderen Baugruppen weniger gegeben.
- *Fahrwerk*: Ebenso wie der Mastkopf weist das Fahrwerk eine komplexe Geometrie auf. Somit ist auch hier das RTM Verfahren, das Normpressen oder das Hybridverfahren aus lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen möglich.

In Anlehnung an (Ashby 2012) kann für die einzelnen Herstellverfahren eine relative Kostenabschätzung vorgenommen werden. Anhang A, Tabelle A.1 zeigt eine detaillierte Auflistung. Hier ist zu erkennen, dass die auftragende Methode (Handlaminieren) sowie das Vacuum RTM Verfahren die geringsten relativen Kosten aufweisen. Jedoch ist bei höheren Stückzahlen speziell das Verfahren des Handlaminierens aufgrund des Personaleinsatzes äußerst kostenintensiv. Faserwickelverfahren, BMC sowie die Pultrusion folgen, das RTM Verfahren hat die höchsten relativen Kosten. Somit ist das größte Potential zur wirtschaftlichen Herstellung bei den Baugruppen zu finden, welche mit dem Vacuum RTM Verfahren hergestellt werden. Dies sind der Mastkopf und das Fahrwerk. Da der Mastkopf im Vergleich zum Fahrwerk deutlich weniger Kräfte zu übertragen hat, ist hier ein geringerer Materialeinsatz zu erwarten. Somit kann angenommen werden, dass der Mastkopf das größte Potential zur Wirtschaftlichkeit in der Herstellung aufweist. Die Herstellung des Mastes mittels Pultrusion zeigt einen mittleren relativen Kostenindex,

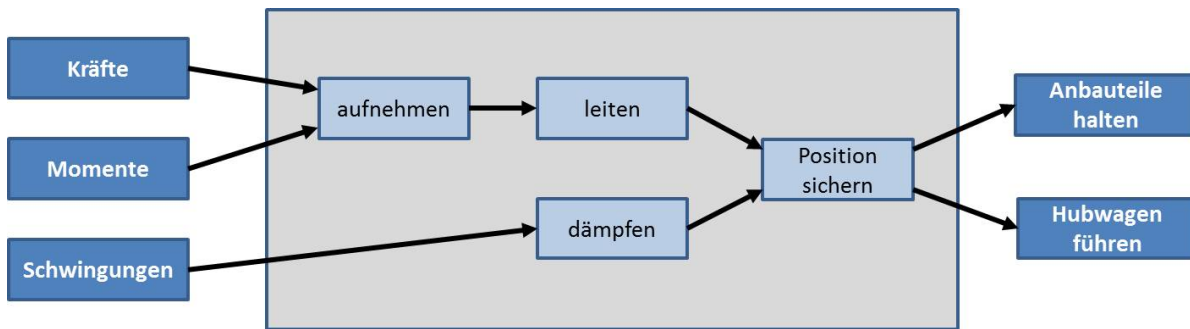


Abbildung 5.1.: Funktionsstruktur

während das BMC Verfahren für das Hubwerk einen im Vergleich etwas höheren relativen Kostenindex aufweist. Für das Lastaufnahmemittel wird aus den oben erwähnten Gründen das geringste Potential für die wirtschaftliche Herstellung gesehen.

Tabelle 5.5 gibt für die Bauteile die Verhältnisse zueinander im direkten Vergleich an. Als Ergebnis ist zu erkennen, dass der Mast das größte Potential bzgl. der Gewichtsreduzierung aufzeigt.

Bauteil	a)	b)	Ergebnis
Mastkopf	5	1	6
Mast	1	3	4
Hubwerk	2	4	6
LAM	3	5	8
Fahrwerk	4	2	6

Tabelle 5.5.: Verhältnis entsprechend der Kriterien a) Potential Energieeinsparung aufgrund von Massereduktion und b) Potential Wirtschaftlichkeit Herstellung

## 5.2. Ableitung der Belastungen

Abbildung 5.1 zeigt die Funktionen des Mastes. Hier lässt sich erkennen, dass die Hauptfunktion im Führen des Hubwagens besteht. Das Halten der Anbauteile (z.B. Kabelführungen) kann vernachlässigt werden. Die Funktionserfüllung wird durch das Material, die Form und den Aufbau des Mastes gewährleistet.

Zur technischen Auslegung von Regalbediengeräten existiert die Norm DIN 15350, Regalbediengeräte: Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnungen. (DIN 15350 1992) Diese Norm ist speziell für Stahltragwerke erarbeitet worden, da im Erscheinungsjahr der Einsatz von Kunststoffen noch nicht gegeben war. Jedoch kann die Norm für die Definition der jeweiligen Lastfälle herangezogen werden, da diese werkstoffunabhängig sind. So sind für den sicheren Betrieb eines RBG ein Standsicherheitsnachweis zu erbringen. Der Standsicherheitsnachweis ist für das Fahrwerk wichtig, da dort mittels Gegendruck-

## 5. Definition der Anforderungen

rollen sichergestellt wird, dass das RBG nicht kippen kann. Somit ist dieser Nachweis nicht für den Mast des RBG zu führen.

Die Nachweise für die Sicherheiten gegen Überschreiten der Ermüdungsgrenze und der Streckgrenze sind unter anderem für den Mast relevant. Dazu müssen zuerst die Kräfte bestimmt werden, welche auf den Mast einwirken. Nach (DIN 15350 1992) können die auftretenden Lasten in Regellastfälle und Sonderlastfälle unterteilt werden. Mit den daraus resultierenden Kräften wird in Kapitel 7 der Nachweis gegen Bauteilversagen geführt.

### 5.2.1. Regellastfälle

Die Regellastfälle unterteilen sich in Eigenlasten, Hublasten und Wirkung horizontaler Kräfte.

Eigenlasten berechnen sich aus der Gewichtskraft der Eigenlast  $G_E$  sowie dem dazugehörigen Eigenlastbeiwert  $\varphi$ . Da im hier ausgewählten RBG aufgrund der Vulkolanräder stoßdämpfende Eigenschaften vorhanden sind, kann mit einem Eigenlastbeiwert  $\varphi = 1,1$  gerechnet werden. Die Eigenlast setzt sich aus Mastkopf, Mast, Fahrwerk, Fahrtrieb und sonstige Anbauteile zusammen und beträgt nach Tabelle 5.2  $G_E = 2.665 \text{ kg}$ .

Die Hublasten berechnen sich aus der Gewichtskraft der Hublasten  $G_{Hu}$  sowie dem Hublastbeiwert  $\psi$ . Der Hublastbeiwert ist nach (DIN 15350 1992, Seite 5f) in die Hubklasse H3 einzuordnen, die Nennhubgeschwindigkeit beträgt nach Tabelle 5.1  $v_H = 2,5 \frac{m}{s} = 150 \frac{m}{min}$ . Mit

$$\psi = 1,3 + 0,0066 \cdot v_H \quad (5.5)$$

beträgt der Hublastbeiwert  $\psi = 2,29$ .

Die Gewichtskraft der Hublasten setzt sich aus Hubwerk, Lastaufnahmemittel und Ladeeinheit zusammen und beträgt nach Tabelle 5.2  $G_E = 435 \text{ kg}$ .

Die Wirkung horizontaler Kräfte setzt sich aus den Massenkräften der Bauteile in x-Richtung sowie aus den Kräften bei Übergabe/Übernahme der Ladeeinheit zusammen. Diese Kräfte müssen jeweils mit dem Schwingbeiwert  $S_W$  multipliziert werden. Nach (DIN 15350 1992) kann hierfür  $S_W = 2$  angesetzt werden. Für den Nachweis der dynamischen Wirkung der Massenkräfte des Mastes sind in Anlehnung an (DIN 15350 1992) die horizontalen Massenkräfte der Ladeeinheit, des Hubwagens, des Lastaufnahmemittels als  $F_1$  sowie für die Massenkraft des Mastes  $F_2$  zu berücksichtigen.  $F_1$  setzt sich aus

$$F_1 = (m_L + m_H) \cdot a_m \cdot S_W \quad (5.6)$$

$$F_1 = 2.175 \text{ N} \quad (5.7)$$

zusammen.  $F_2$  setzt sich wie folgt zusammen:

$$F_2 = m_S \cdot a_m \cdot S_W \quad (5.8)$$

$$F_2 = 8.250 \text{ N} \quad (5.9)$$



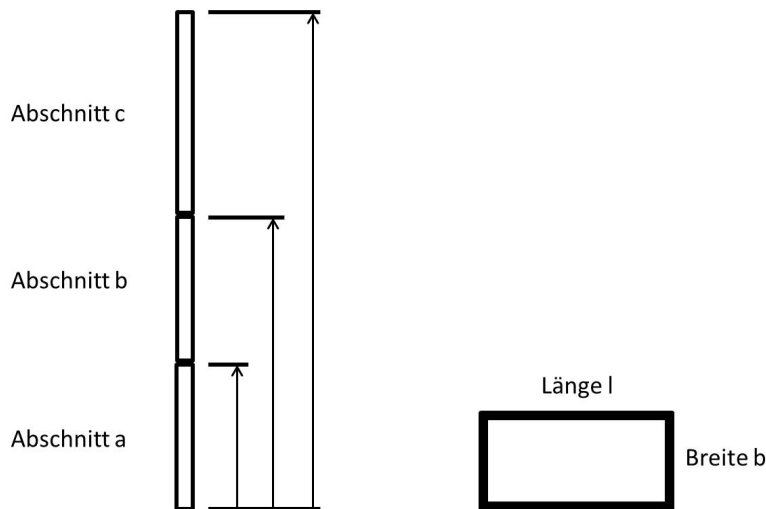


Abbildung 5.2.: Maststruktur zur Bestimmung der maximalen Auslenkung

### 5.2.2. Sonderlastfälle

Als relevanter Sonderlastfall für die Stabilität des Mastes ist in Anlehnung an (DIN 15350 1992) der Pufferstoß zu nennen. Dieser setzt sich aus der Pufferkraft  $F_P$  multipliziert mit dem Schwingbeiwert bei Pufferstoß  $S_P$  zusammen. Nach (DIN 15350 1992) beträgt der Schwingbeiwert bei Pufferstoß  $S_P = 1,5$ . Die Pufferverzögerung wird mit  $a_P = 10 \frac{m}{s^2}$  angenommen. Folglich treten für die horizontal wirkenden Kräfte bei Pufferstoß mit  $a_P$  für  $a_m$  nach Gleichung 5.6 und Gleichung 5.8 folgende Kräfte auf:

$$F_{1P} = 6.525 N \quad (5.10)$$

$$F_{2P} = 24.750 N \quad (5.11)$$

### 5.2.3. Bestimmung der maximalen Mastauslenkung

Um die Steifigkeit des Mastes bestimmen zu können, muss eine maximale Auslenkung festgelegt werden. Hierzu werden die in Tabelle 5.1 angegebenen Werte für einen Vergleichsmast (Abbildung 5.2) herangezogen. Der Vergleichsmast ist angenähert durch ein Rechteckprofil aus Stahl abgebildet. Er ist in drei Abschnitte mit unterschiedlichen Wanddicken und Flächenträgheitsmomenten gegliedert. Es wird für die reguläre Verzögerungsfahrt (Regellastfall) die Mastauslenkung bestimmt. Dabei wird der Mast durch folgende Größen belastet:

- Trägheitsmomente der Massen von Mast und Mastanbauteilen
- Trägheitsmomente der Massen von Mastkopf, Last und Hubwagen
- Statisches Moment um z-Achse aufgrund der Last und des Hubwagens

## 5. Definition der Anforderungen

<b>Geometrie</b>		
Länge l		0,4 m
Breite b		0,25 m
Höhe h	Abschnitt a	5 m
	Abschnitt b	5 m
	Abschnitt c	7 m
Wanddicke	Abschnitt a	12,5 mm
	Abschnitt b	10 mm
	Abschnitt c	8 mm
<b>Massen</b>		
Mastkopf		30 kg
Last + Hubwagen		435 kg
Mastanbauteile		23,59 $\frac{kg}{m}$
Mast	Abschnitt a	122,66 $\frac{kg}{m}$
	Abschnitt b	98,91 $\frac{kg}{m}$
	Abschnitt c	79,64 $\frac{kg}{m}$
<b>Sonstiges</b>		
Flächenträgheitsmoment um z-Achse	Abschnitt a	$400 \cdot 10^{-6} m^4$
	Abschnitt b	$326 \cdot 10^{-6} m^4$
	Abschnitt c	$265 \cdot 10^{-6} m^4$

Tabelle 5.6.: Technische Daten zur Bestimmung der Auslenkung

Auf Basis der angegebenen Werte und in Anlehnung an (Gross 2012) wird der Vergleichsmast an den Abschnittsgrenzen nach Abbildung 5.2 freigeschnitten und die jeweiligen Kräftegleichgewichte aufgestellt. Nun kann für jeden Abschnitt separat die Verschiebung bestimmt und anschließend aufsummiert werden. Die detaillierte Berechnung (siehe Anhang B) führt auf eine Biegung in x-Achse von 20,32 cm.

### 5.3. Bestimmung der benötigten Maststeifigkeit

Aufbauend auf dem Ergebnis aus Kapitel 5.2.3 soll der Mast im regulären Betrieb eine Auslenkung von 20,32 cm erfahren. Um die benötigte Maststeifigkeit  $E \cdot I$  bestimmen zu können, wird in Anlehnung an (Gross 2012) die Durchbiegung bzw. Maststeifigkeit bestimmt. Die Mastauslenkung ist die Summe der Auslenkungen des statischen Moments von Last und Hubwagen, der Trägheitskraft von Kopf, Last und Hubwagen sowie der Trägheitskraft des Mastes mit Mastanbauteilen.

$$\omega_{ges} = \omega_{stat} + \omega_{Trägheit_{Mastkopf, Last, Hubwagen}} + \omega_{Trägheit_{Mast}} = 0,2032 \text{ m} \quad (5.12)$$

Die Auslenkung durch das statische Moment ist

$$\omega_{stat} = S_W \cdot \frac{M_{stat} \cdot h_{Mast}^2}{2 \cdot E \cdot I_{zz}} \quad (5.13)$$

Hierbei ist

$$M_{stat} = \psi \cdot l_{SP_{LAM, Mast}} \cdot m_{Last, Hubwagen} \cdot g \quad (5.14)$$

Die Auslenkung durch die Trägheitskraft von Mastkopf, Last und Hubwagen ergibt sich zu

$$\omega_{Trägheit_{Mastkopf, Last, Hubwagen}} = S_W \cdot \frac{(m_{Last, Hubwagen} + m_{Mastkopf}) \cdot a_n \cdot h_m^3}{3 \cdot E \cdot I_{zz}} \quad (5.15)$$

Die Auslenkung durch die Trägheitskraft des Mastes und Mastanbauteile ergibt sich zu

$$\omega_{Trägheit_{Mast}} = \frac{(m_{Mast} + m_{Mastanbauteile}) \cdot a_n \cdot h_{Mast}^4}{8 \cdot E \cdot I_{zz}} \quad (5.16)$$

Das Produkt  $E \cdot I_{zz}$  kann als ein Faktor betrachtet werden und die Gleichung kann nach diesem aufgelöst werden. Mit den Werten aus Tabelle 5.2 ergibt sich

$$E \cdot I_{zz} = 413.736,56 \frac{\text{m}^4}{\text{s}^2} \cdot q_{Mast} + 47.317.336,06 \text{ Nm}^2 \quad (5.17)$$

Dieser Faktor wird im weiteren Verlauf in Kapitel 7 benötigt, um die nötige Steifigkeit des Vergleichsmastes zu bestimmen.



## 6. Werkstoffauswahl

Nach (Ehrlenspiel and Kiewert 1990) stehen die Produktrisiken bei der Einführung neuer Materialien im direkten Zusammenhang zur Vertrautheit eines Materials. Hierbei kann in fünf Bereiche unterteilt werden. Tabelle 6.1 zeigt die Abstufung des Bekanntheitsgrades bei der Einführung eines Materials. Bereich a ist die Werkstoffneueinführung. Die Bereiche b, c und d beschreiben eine Werkstoffsubstitution mit steigendem Bekanntheitsgrad des Materials. Abschließend beschreibt Bereich e eine Werkstoffalternative.

Im vorliegenden Betrachtungsfall liegt der Fall der Substitution vor. Dabei eine genaue Zuordnung vorzunehmen ist schwierig. Da aufgrund der Materialkosten kein völlig neuer Werkstoff eingesetzt werden soll, fällt Bereich a aus. Ebenso Bereich e, da fast alle RBG-Hersteller bisher Stahl bzw. Aluminium als Konstruktionswerkstoff einsetzen. Folglich können die Bereiche b, c bzw. d zutreffen.

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, gibt es erste Untersuchungen bzgl. des Einsatzes von FKV bei Regalbediengeräten. Weiter setzen einzelne Hersteller in Bauteilen, die keine Last außer ihr Eigengewicht tragen, vereinzelt Kunststoffe ein. Folglich ist der Werkstoff in der Branche bekannt. Da jedoch Kunststoffe bzw. FKV aktuell noch in der Entwicklung bzw. in der Einsatzuntersuchung sind, kann nicht davon ausgegangen werden, dass der entsprechende Werkstoff bereits vollumfänglich eingesetzt wird. Folglich sind die Bereiche b und c zu betrachten.

Die Herausforderung bei der Werkstoffauswahl ist die Berücksichtigung der großen Anzahl der zu erfüllenden Randbedingungen und Optimierungsgrößen. Wird ein Werkstoff gesucht, welcher nur eine Optimierungsgröße aufweist (z.B. minimales Gewicht), so ist das einfach. Müssen jedoch noch weitere Bedingungen erfüllt sein (z.B. niedrige Materialkosten), so wird eine Funktion definiert, welche alle Größen in Einklang bringt. Kommen mehr als zwei Randbedingungen bzw. Optimierungsgrößen in Betracht, so wird diese Funktion entsprechend komplex (Ashby 2011).

Um diese Herausforderung zu bewältigen, ist ein methodisches Vorgehen sinnvoll. Nachfolgend werden verschiedene Vorgehensweisen bei der Materialauswahl vorgestellt und daraus eine geeignete Vorgehensweise entwickelt.

### 6.1. Vorgehen bei der Werkstoffauswahl

In der Vergangenheit hat nach (Ashby 2005) der Ingenieur die Materialauswahl entsprechend seinen Erfahrungen vorgenommen. (Reuter 2007) sieht darin aber ein Problem. Da in der Praxis bei Neu- oder Weiterentwicklungen das Risiko möglichst gering gehalten wird, wird auf bewährte Werkstoffe zurückgegriffen. Hierbei bleibt die Innovation in

Situation bei der Werkstoffauswahl	
<b>a</b>	Völlig neuer Werkstoff, weder im Unternehmen noch im Allgemeinen
<b>b</b>	Ein Werkstoff, welcher zwar im Allgemeinen bekannt ist, jedoch in der Branche noch unbekannt ist
<b>c</b>	Ein für das Unternehmen neuer Werkstoff, jedoch bereits in der Branche eingesetzt
<b>d</b>	Ein in vergleichbaren Produkten von Marktbegleitern eingesetzter Werkstoff, für das Unternehmen bekannter Werkstoff, jedoch für das Produkt im Unternehmen noch nicht eingesetzt
<b>e</b>	Ein dem Unternehmen bekannter Werkstoff und bereits in ähnlichen Produkten eingesetzt und wird nun im neuen Produkt eingesetzt.

Tabelle 6.1.: Bekanntheitsgrad eines Materials (Ehrlenspiel and Kiewert 1990) und (Reuter 2007)

Bezug auf den Einsatz neuer, moderner Werkstoffe oft untergeordnet. Jedoch sind Konstruktionsprozesse meist ergebnisoffen. Es gibt keine eindeutige, korrekte Lösung. Es gibt eine Vielzahl von Lösungen, welche besser und schlechter für das jeweilige Problem geeignet sein können.

Zu Beginn des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses steht das Design bzw. die Konstruktion noch nicht fest, somit können alle Materialien in Betracht gezogen werden. Wenn das Design nach und nach durch den Konstruktionsprozess detailliert wird, werden dadurch auch die möglichen Materialien eingeschränkt und nur noch wenige Materialien erfüllen entsprechende Kriterien. Weiter kann die Auswahl des Materials nicht unabhängig von dessen Herstellprozess betrachtet werden, da in diesem Fall die Kosten des Materials als auch des Herstellprozesses mit berücksichtigt werden sollten (Ashby 2005).

Der Werkstoffauswahlprozess kann je nach

- Produktart,
- Konstruktionsart oder
- Stückzahl

entsprechend komplex sein (Reuter 2007). Ein weiterer Einflussfaktor auf die Komplexität des Werkstoffauswahlprozesses ist der Neuheitsgrad des Werkstoffes, da sich hieraus auch die Frage nach vorhandenen Informationen über verschiedene Werkstoffe ableiten lässt. "Je neuer das Material, umso mehr technische, technologische und wirtschaftliche Risiken sind für das Produkt zu reduzieren."(Reuter 2007, Seite 25)

In (VDI 2221 1993) ist eine empfohlene Vorgehensweise angegeben. Abbildung 6.1 zeigt diese Arbeitsweise, ergänzt mit werkstoffrelevanten Themen (nach (Reuter 2007)).

## 6.1. Vorgehen bei der Werkstoffauswahl

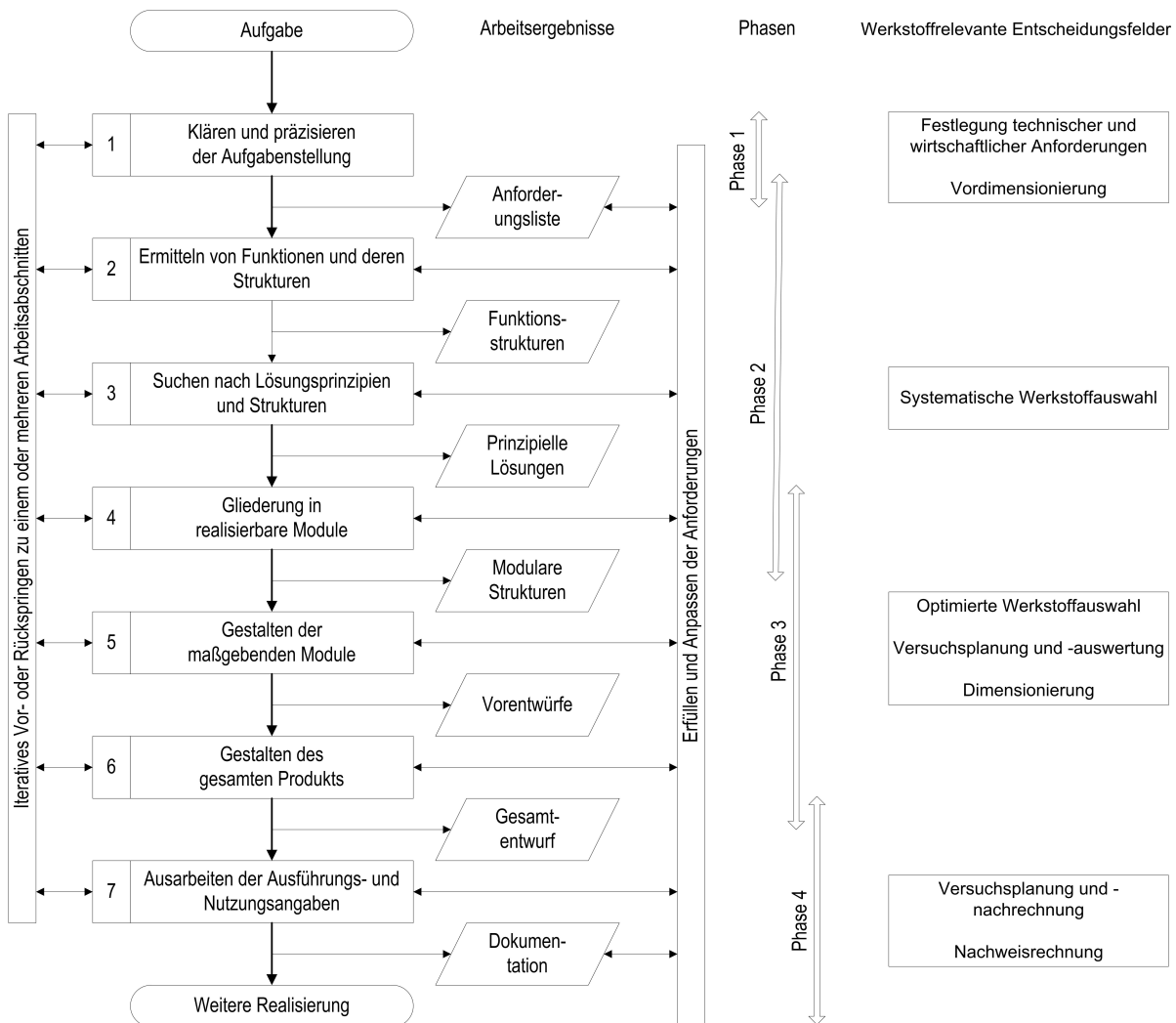


Abbildung 6.1.: Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren mit werkstoffrelevanten Feldern

(Reuter 2007), (VDI 2221 1993)

### 6.1.1. Der Auswahlprozess nach Ashby

Vor der Materialauswahl werden Kriterien festgelegt. Dabei gibt es Kriterien, die zu erfüllen sind (Randbedingungen) und solche Kriterien, welche möglichst nahe am Zielwert liegen sollen (Zielgrößen), ohne diesen zwingend erreichen zu müssen. In diesem Zusammenhang spricht (Ashby 2011) von einem sog. Zielkonflikt. Welche Kriterien müssen erfüllt sein und wie wird die Wertigkeit der Kriterien bestimmt, wenn zwar mehrere Kriterien erfüllt sein müssen, dies aber nicht möglich ist.

In der Regel gibt es mehr zwingende Anforderungen (Randbedingungen) als freie Variablen (Zielgrößen), nach denen optimiert werden kann. Zuerst werden die Randbedingungen festgelegt und auf Basis dieser die Materialien ausgewählt, welche diese Anforderungen erfüllen. Diese Auswahl wird dann unter Berücksichtigung der Zielgrößen angepasst. Beispielhaft soll ein Material gesucht werden, welches eine gewisse Steifigkeit und Härte (Randbedingungen) besitzen muss und dabei noch leicht und günstig (Zielgrößen) sein soll. Eine mögliche (und häufige) Vorgehensweise ist, zuerst die Materialien ausscheiden zu lassen, welche nicht die Grenzen bzgl. Steifigkeit und Härte einhalten. Anschließend wird unter den übrigen Materialien das ausgewählt, welches am leichtesten und am günstigsten ist. Um die Materialauswahl zu unterstützen, können mit Hilfe von (Ashby 2012) Materialeigenschaftsdiagramme erarbeitet werden, welche die Materialauswahl anhand von Werkstoffkenngrößen vereinfacht.

In Anlehnung an (Ashby 2011, S. 123) kann der Materialauswahlprozess in folgende Schritte unterteilt werden:

- *Festlegung:* Zu Beginn müssen die Funktion, die Randbedingungen, die Zielgrößen und die freien Variablen für die Aufgabe definiert werden
- *Umwandlung:* Interpretation der Anforderungen in die Bereiche Funktion, Randbedingungen, Ziele und freie Variablen zu Materialkennwerten
- *Selektion:* Auswahl der Materialien, die die Randbedingungen erfüllen
- *Priorisieren:* Die ausgewählten Materialien müssen entsprechend ihrer Eignung (die Ziele am Besten zu erreichen) sortiert werden
- *Dokumentation:* Die bestplatzierten Werkstoffe werden anhand ihrer Vergangenheit, bisheriger Benutzung und der daraus abgeleiteten Eigenschaften hin überprüft und beurteilt
- *Entscheidung:* Auf Basis der gewonnenen Kenntnisse kann ein Material ausgewählt werden

Bei den Zielgrößen kann es erforderlich sein, in harte und weiche Faktoren zu unterscheiden, um die Wichtigkeit der einzelnen Faktoren zu berücksichtigen

Hat der Auswahlprozess mehr Randbedingungen als Zielgrößen, so gibt es nach (Ashby 2011) zwei verschiedene Vorgehensweisen, die analytische Methode und die graphische Methode.



### Analytische Vorgehensweise

Die analytische Methode basiert nach (Ashby 2011) auf einer min-max-Problematik. Nachfolgend soll anhand eines Beispiels diese Vorgehensweise erläutert werden.

Für einen Träger mit der Länge  $L = 1 \text{ m}$  soll ein möglichst leichtes Material gesucht werden. Gefordert sind eine bestimmte Steifigkeit  $d = 3 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$  und Bruchlast  $F = 10^5 \text{ N}$ .

$$\tilde{m} = \min(m_1, m_2) \quad (6.1)$$

$$m = A \cdot L \cdot \rho \quad (6.2)$$

$$d = \frac{E \cdot A}{L} \quad (6.3)$$

$$F = \sigma \cdot A \quad (6.4)$$

Ziel ist es, Gleichung 6.1 zu lösen.  $m_1$  steht dabei für die Minimierung der Masse bzgl. der Steifigkeit und  $m_2$  für die Minimierung der Masse bzgl. der Festigkeit. Um jedoch dieses Problem zu lösen, muss Gleichung 6.2 entsprechend der Zielgrößen angepasst werden. Wird Gleichung 6.3 bzgl. der Fläche  $A$  umgeformt und in Gleichung 6.2 eingesetzt, so ergibt sich

$$m_1 = L^2 \cdot d \cdot \frac{\rho}{E} \quad (6.5)$$

Da die Länge  $L$  und die Steifigkeit  $S$  vorgegebene Werte sind, sind die bestimmenden Faktoren für die Materialauswahl die Dichte  $\rho$  und der E-Modul  $E$ . Folglich lässt sich zur Bestimmung des geeigneten Materials die Gleichung 6.5 vereinfachen in

$$M_1 = \frac{\rho}{E} \quad (6.6)$$

Analog zur Steifigkeit ist die Vorgehensweise auch für die Festigkeit und es ergeben sich folgende Gleichungen:

$$m_2 = L \cdot F \cdot \frac{\rho}{\sigma} \quad (6.7)$$

$$M_2 = \frac{\rho}{\sigma} \quad (6.8)$$

Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht über drei mögliche Materialien und deren Werkstoffkennwerten. Die Werte für  $m_1$  und  $m_2$  wurden entsprechend nach Gleichung 6.5 und Gleichung 6.7 bestimmt. (Ashby 2011)

Bei gegebener Steifigkeit und Bruchlast ist unter den drei ausgewählten Werkstoffen der Werkstoff Ti-6-4 der Leichteste.

## 6. Werkstoffauswahl

Material	Dichte $\rho$ in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	E-Modul $E$ in $[GPa]$	Spannung $\sigma$ in $[MPa]$	Masse $m_1$ in $[kg]$	Masse $m_2$ in $[kg]$	Zielmasse $\tilde{m}$ in $[kg]$
1020 Stahl	7.850	200	320	1,12	2,45	2,45
6061 Al	2.700	70	120	1,16	2,25	2,25
Ti-6-4	4.400	115	950	1,15	0,46	1,15

Tabelle 6.2.: Materialauswahl für einen leichten Stab mit vorbestimmter Steifigkeit und Festigkeit

### Graphische Methode

Die graphische Methode ist eine weitere Möglichkeit, Werkstoffe auf Basis von Grenzwerten auszuwählen. (Ashby 2012) ist eine Werkstoffdatenbank, welche diese Methode unterstützt. Dabei können verschiedene Diagramme erzeugt werden, mit denen Materialeigenschaften verglichen werden können. Abbildung 6.2 zeigt sämtliche in der Datenbank vorhandenen Werkstoffe, aufgetragen mit dem E-Modul auf der Abszissenachse sowie der Dichte auf der Ordinatenachse. Insgesamt sind 3798 Werkstoffe in der Datenbank hinterlegt, was eine fundierte Auswahl des geeigneten Werkstoffes, bzw. der Werkstoffkombination ermöglicht.

### Trade-off Strategie

Die Trade-off Strategie ist eine Ergänzung zu den beschriebenen Vorgehensweisen. Dabei werden bei den Zielgrößen Grenzwerte eingefügt, die nicht überschritten werden dürfen. Sollen zum Beispiel die Masse (*so leicht wie möglich*) und die Kosten (*so günstig wie möglich*) eines Bauteils optimiert werden, so kann das im Widerspruch stehen. Massenreduktion bedeutet leichteres Material, was in der Regel teurer ist. Werden für die Kosten eine Obergrenze eingeführt, so kann das leichteste Material ausgewählt werden, welches diese Kostenobergrenze einhält. Abbildung 6.3 veranschaulicht dieses Vorgehen (in Anlehnung an (Ashby 2011, Seite 205)).

### Ansatz der Formoptimierung

(Ashby 2011) beschreibt im Ansatz der Formoptimierung, wie die Form Einfluss auf das Bauteilverhalten hat. Je nach Belastungsfall eignen sich unterschiedliche Bauteilgeometrien zur Verbesserung des Bauteilverhaltens. Hierzu führt (Ashby 2011) den sog. Formfaktor  $\phi$  ein.

$$\phi = \frac{EI}{EI_0} \quad (6.9)$$

Dieser Faktor beschreibt die Effizienz der Materialausnutzung mit der gewählten Geometrie. Formfaktoren sind dimensionslose Faktoren, die für elastische Biegung das Verhältnis zwischen den Biegesteifigkeiten einer bestimmten Bauteilgeometrie und eines

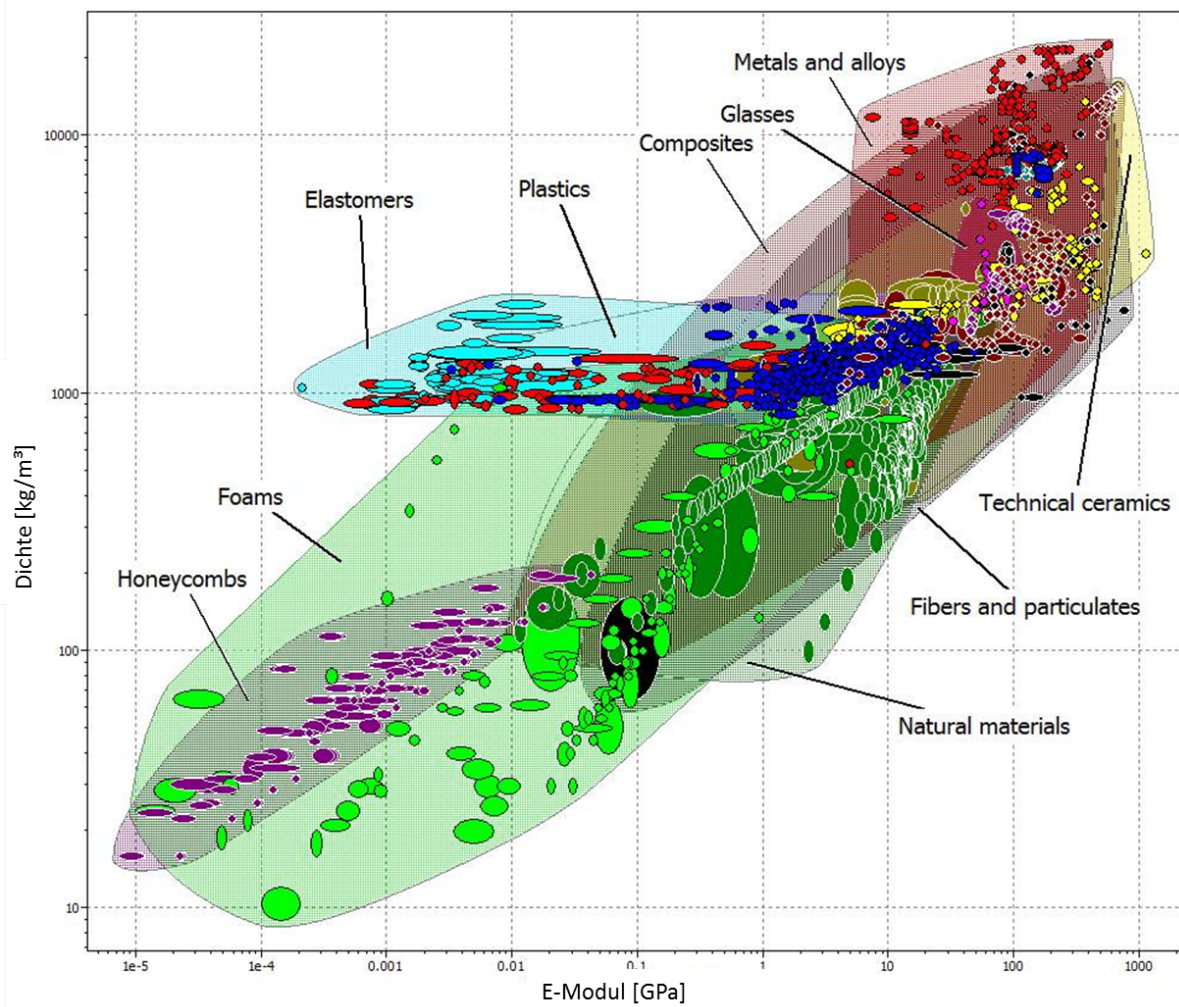


Abbildung 6.2.: Werkstoffübersicht  
(Ashby 2012)

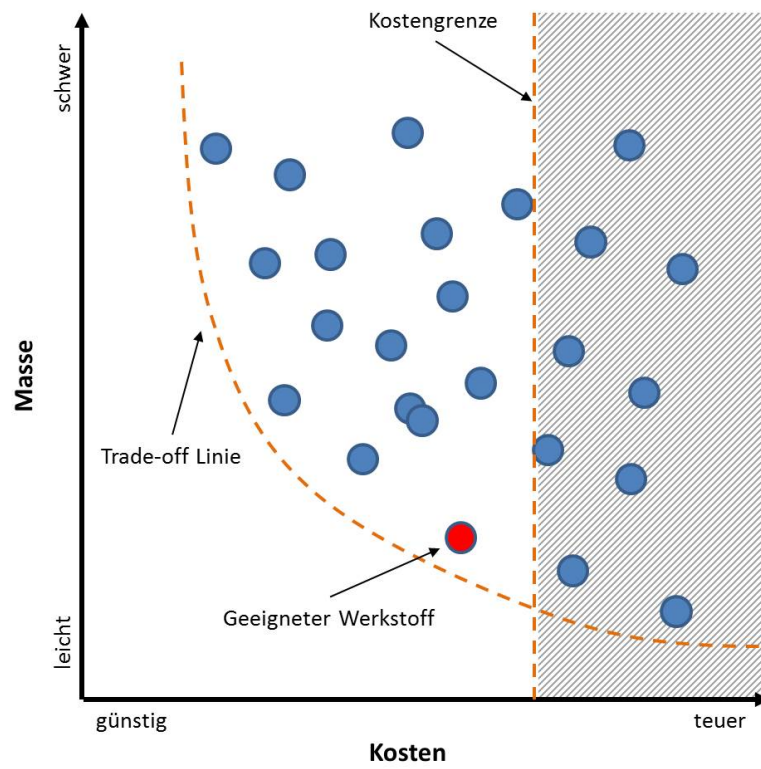


Abbildung 6.3.: Trade-off Strategie  
(Ashby 2011)

quadratischen Vollquerschnitts gleicher Querschnittsfläche angeben. Ein quadratischer Vollquerschnitt hat also den Formfaktor für Biegung  $\phi = 1$ .

### 6.1.2. Der Auswahlprozess nach Reuter

In Anlehnung an (Reuter 2007) lässt sich der Werkstoffauswahlprozess in fünf Schritte unterteilen.

- 1 *Ermittlung der Materialanforderungen:* In dieser Phase werden alle Anforderungen an das Material festgelegt. Dies wird in der Regel in einem Lastenheft festgehalten. Auf Basis dieses Lastenheftes wird die Materialanforderungsliste erzeugt, welche als Grundlage für den weiteren Materialauswahlprozess dient.
- 2 *Vorauswahl geeigneter Werkstoffe:* Die wesentlichen Suchmerkmale aus der Materialanforderungsliste werden identifiziert und anhand derer eine entsprechende Materialvorauswahl getroffen. Diese Vorauswahl dient als Basis für das weitere Vorgehen. Zu beachten ist, dass diese Werkstoffe lediglich eine Eingrenzung darstellen und noch nicht auf jede relevante Anforderung hin im Detail überprüft wurden. Es wurden lediglich die Materialien ausgeschlossen, die durch eine erste Überprüfung die wesentlichen Merkmale nicht erfüllen. Als Ergebnis dieser Phase ergibt sich eine Liste möglicher Materialien.
- 3 *Feinauswahl und Bewertung:* Nun werden die Materialien detailliert auf jede Anforderung hin überprüft und entsprechende weitere Ziele berücksichtigt. Gewichtungsfaktoren können den Anforderungen und weiteren Zielen Wichtigkeiten verleihen. Über eine Bewertungsmatrix kann dann eine Rangfolge erstellt werden. Resultat davon ist die Liste der Versuchswerkstoffe.
- 4 *Evaluierung und Validierung von Produkteigenschaften:* Für die am erfolgversprechendsten Werkstoffe wird eine detaillierte Analyse (inkl. Versuchsreihen) durchgeführt, ob die werkstoffspezifischen Eigenschaften die Anforderungen erfüllen. Hier wird die Entscheidungsvorlage erstellt.
- 5 *Werkstoffentscheidung:* Abschließend wird der Werkstoff, der am geeignetsten ist, ausgewählt.

Die hier angegebene Phase 5 ist nach (Reuter 2007) keine eigenständige Phase. Zum besseren Verständnis soll die Darstellung als Phase gewählt werden. Dieser Auswahlprozess erfolgt klassisch nach der Top-Down-Methode (Reuter 2007, S. 40).

#### Potenziale und Grenzen

Nach (Reuter 2007) muss eine Substitution des Materials sich in einem besseren Produkt niederschlagen. Beurteilt werden kann dies an der Wirtschaftlichkeit, der technischen

## 6. Werkstoffauswahl

Optimierung (z.B. Leichtbau, Qualität) oder an immateriellen Aspekten (z.B. Know-How-Gewinn, ökologische Aspekte). Die Schwächen der systematischen Materialsuche im Vergleich zur Verwendung des bewährten Standardwerkstoffes sind nach (Reuter 2007, Seite 42f):

- höhere Arbeitsbelastung
- erhöhte Komplexität des Gesamtprozesses
- erhöhter Konstruktions- und Versuchsaufwand
- mögliches Auftreten unerwünschter Zielkonflikte
- nie völlig auszuschließende Subjektivität

“Ein systematischer Auswahlprozess “lebt” von einer nachvollziehbaren, quantifizierbaren Entscheidungsfindung.” (Reuter 2007, Seite 43)

### 6.1.3. Der Auswahlprozess nach Kutz

(Kutz 2002) unterteilt den Werkstoffauswahlprozess in die Phasen Erstauswahl, Vergleich von Alternativen und finale Auswahl. In der Erstauswahl werden die Anforderungen an das Material und den Herstellprozess definiert. Diese können in Funktionserfüllung, Herstellbarkeit, Kosten, Dauerfestigkeit und Robustheit unterteilt werden. Auf Basis dieser Definitionen kann mit der ersten Materialauswahl begonnen werden. Zu Beginn wird kein Material ausgeschlossen. Z.B. kann Stahl für ein Konzept der richtige Werkstoff sein, während ein Kunststoff für ein anderes Konzept der geeignete Werkstoff ist, wobei beide Konzepte die gleiche Funktion erfüllen.

(Kutz 2002) gibt vier Methoden an, wie die erste Materialauswahl erfolgen kann:

- *Methode der Grenzen der Materialien:* Es werden zuerst die Eigenschaften in zwei Kategorien eingeteilt. Diese sind die harten Anforderungen (Eigenschaften, die erfüllt werden müssen) und die weichen Anforderungen (wünschenswerte Eigenschaften bzw. Eigenschaften, die es zu optimieren gilt).
- *Methode der Kosten pro Einheit:* Diese Methode eignet sich, wenn eine Eigenschaft als zentrales Kriterium erfüllt sein muss, während andere Eigenschaften nachrangig sind.
- *Methode nach Ashby:* Bei Ashby kann über verschiedene Diagramme Zusammenhänge zwischen einzelnen Eigenschaften hergestellt werden. Weiter können hier auch Materialformen berücksichtigt werden. (siehe Kapitel 6.1.1)
- *Methode nach Dargie:* Bei Dargie wird ein computerbasierte Auswahl getroffen. Dabei wird ein Klassifizierungscode mit bis zu acht Stellen eingeführt. Jede dieser Stellen steht für eine Materialeigenschaft (z.B. Dichte). Weiter sind die Werkstoffe

in einer Datenbank entsprechend dieser Klassifizierung bewertet. Somit kann über eine Definition des Klassifizierungscode eine Materialvorauswahl getroffen werden, welche bestimmte Randbedingungen erfüllt. Im Gegensatz zu Ashby werden hier nur Randbedingungen berücksichtigt.

Nach der ersten Vorauswahl von Materialien werden in einem nächsten Schritt die übrig gebliebenen Materialien verglichen und der Herstellprozess mit berücksichtigt, bis möglichst wenige geeignete Materialien übrig bleiben (Vergleich von Alternativen). (Kutz 2002) beschreibt beispielhaft die Gewichts-Methode mittels der Digital-Logic-Method und der Performance-Index-Method. Weitere Auswahlmethoden sind in (Farag 2008) und (Dieter 1997) dargestellt. Diese stellen keine grundlegende Abweichung zu der hier beschriebenen Vorgehensweise dar.

Abschließend kann mit den vielversprechendsten Materialien eine detaillierte Ausarbeitung statt finden, und dabei die jeweiligen Eigenschaften des Materials herausgearbeitet werden. Hierbei wird sich letztendlich auf ein Material festgelegt.

### 6.1.4. Der Auswahlprozess nach Grosch

Nach (Grosch 1986) kann die Werkstoffauswahl nicht nur anhand der konstruktiven Anforderungen aus der Funktion abgeleitet werden. Einzelne Fertigungsverfahren erfordern spezielle Werkstoffeigenschaften, zu dem nehmen Fertigungsverfahren Einfluss auf die konstruktiven Lösungen. Folglich muss die richtige Werkstoffauswahl die Anforderungen der konstruktiven Lösung und der zugehörigen Fertigungsverfahren an den Werkstoff berücksichtigen. "Die geforderten Eigenschaften sind also immer die Summe von Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften" (Grosch 1986, S. 1).

In Abbildung 6.4 beschreibt (Grosch 1986) die Vorgehensweise der Werkstoffauswahl. Nach einer Analyse der Aufgabe werden die Anforderungen an das Material erarbeitet und ein werkstoffbezogenes Anforderungsprofil erstellt. Dies wird mit existierenden Materialien verglichen und es erfolgt eine Werkstoffauswahl, sofern ein Werkstoff existiert, welcher die Anforderungen erfüllt. Abschließend wird der Werkstoff sowie das Bauteil werkstoffgerecht optimiert. Erfüllt kein Werkstoff die Anforderungen, muss der Werkstoffauswahlprozess mit geänderten Anforderungen von neuem begonnen werden oder die Herstellung des Bauteils ist nicht möglich.

## 6.2. Materialauswahl RBG-Mast

Jeder Materialauswahlprozess hat eine vergleichbare Vorgehensweise, Definition der Randbedingungen und daraus resultierend die Eingrenzung der zur Verfügung stehenden Materialien bis hin zum ausgewählten Material. Die nachfolgende Werkstoffauswahl wird in Anlehnung an (Ashby 2011) und (Kutz 2002) erfolgen. Die Werkstoffkombination als Faser-Kunststoff-Verbund sowie das Herstellverfahren der Pultrusion wurden bereits festgelegt (siehe Kapitel 1 und 5).

## 6. Werkstoffauswahl

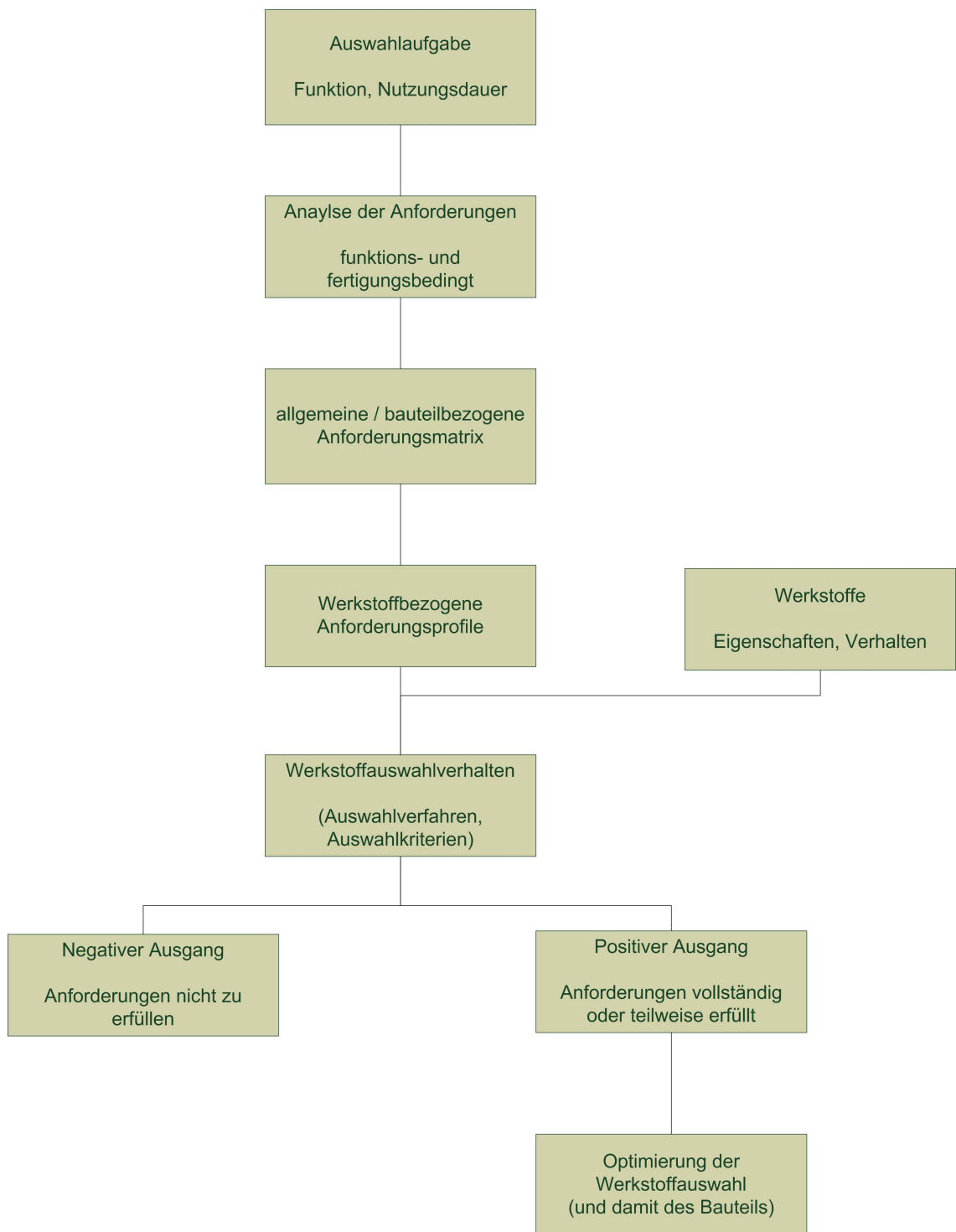


Abbildung 6.4.: Werkstoffauswahl (Grosch 1986)



Zu Beginn werden die Randbedingungen (maximale Mastauslenkung) sowie die Zielgrößen (Gewicht und Kosten) bestimmt. Auf Basis dieser Größen werden die geeigneten Materialien bzw. Materialkombinationen ausgewählt. Bzgl. der Mastauslenkung wird ein Material bzw. eine Materialkombination mit hoher Steifigkeit und Festigkeit benötigt. Dazu eignet sich der E-Modul als Kenngröße. Die Dichte eines Werkstoffes kann als Kennwert für den Masseneinfluss herangezogen werden.

Ableitend wird aus den Zielgrößen mittels der graphischen Methode (Ashby 2012) das geeignete Material ausgewählt. Dazu werden zuerst die Dichte und der E-Modul in ein Verhältnis zueinander gesetzt, um geeignete Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen zu erhalten. Anschließend werden die Kosten der vorausgewählten Materialien bzw. Materialkombinationen verglichen, um die geeigneten Werkstoffe bzw. die geeigneten Werkstoffkombinationen zu ermitteln.

Nach Kapitel 6.1.1, Gleichung 6.1 lässt sich die Zielfunktion für die Optimierung der Masse ableiten. Dabei ist  $m_1$  die Optimierung der Masse bzgl. der Steifigkeit und  $m_2$  bezüglich der Festigkeit bzw. Bruchlast. Ist eine Vorauswahl bzgl. der Masse erfolgt, können diese Materialien bzgl. der Kosten gegenübergestellt werden.

### Minimierung der Masse

In Kapitel 6.1.1 wurden bereits aus Gleichung 6.1 nachfolgende Gleichungen (vgl. 6.6 und 6.8) abgeleitet:

$$m_1 = \frac{\rho}{E} \quad (6.10)$$

$$m_2 = \frac{\rho}{\sigma} \quad (6.11)$$

Um das geeignete Material bzgl. der Steifigkeit bestimmen zu können, werden nun mittels (Ashby 2012) die verschiedenen Materialien aus Kapitel 4.2 bzw. Anhang C gegenübergestellt.

Abbildung 6.5 zeigt die in Anhang C dargestellten FKV mit der Dichte aufgetragen in Abhängigkeit des E-Modul. Die Darstellung eines Feldes eines Materials und nicht als einzelner Punkt ergibt sich aufgrund dem Mengenverhältnis zwischen Fasern und Matrix. Um diesen Zusammenhang näher zu betrachten, zeigt Tabelle 6.3 die Variation der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit des Mengenverhältnisses von Faser zu Matrix am Beispiel des FKV Epoxidmatrix mit Aramidfaser verstärkt als unidirektionales Composite. Je nach Faseranteil schwankt der E-Modul sowie der Preis. Die Dichte ist konstant, da die hier eingesetzte Aramidfaser sowie die Epoxidmatrix vergleichbare Dichtewerte aufweisen.

Weiter sind drei FKV farblich gekennzeichnet, die die gleiche Matrix (Epoxy), jedoch unterschiedliche Faserarten (Glasfaser, Aramidfaser und Kohlenstofffaser) beinhalten. Bezüglich des E-Moduls kann hier im Faser-Kunststoff-Verbund ein deutlicher Vorteil der Kohlenstofffaser gegenüber der Glasfaser und Aramidfaser festgestellt werden. Auch ist zu erkennen, dass sich die Dichte in einem ähnlichen Bereich befindet. Somit ist bei diesen Kriterien die Kohlenstofffaser vorteilhaft. Um die Auswahl weiter eingrenzen

## 6. Werkstoffauswahl

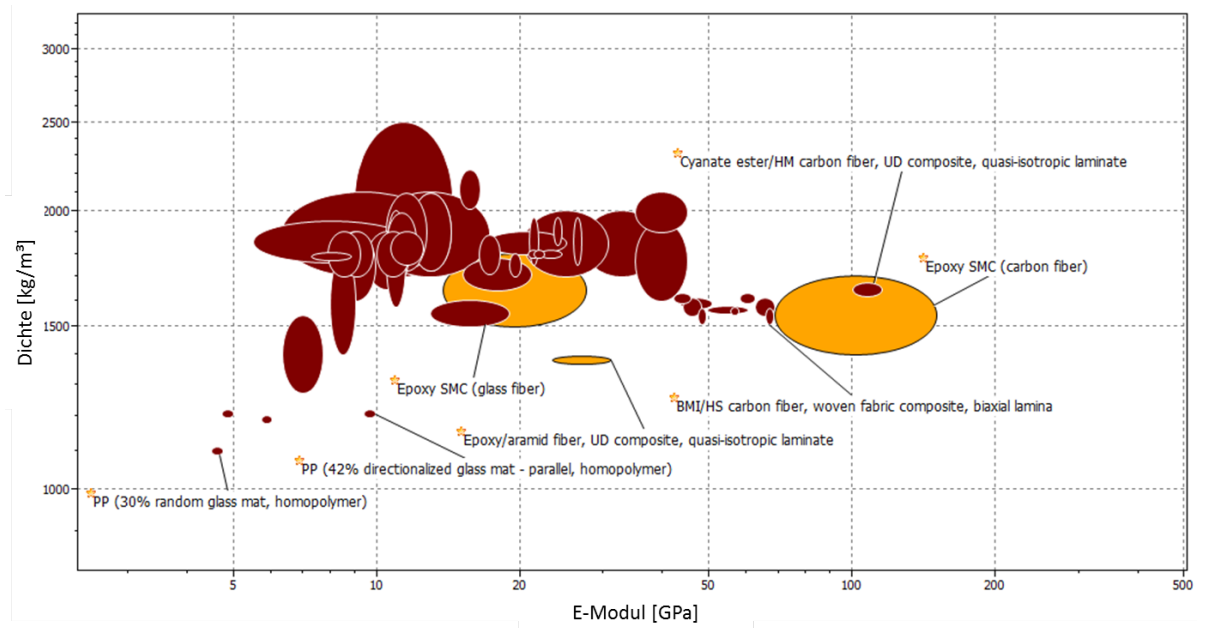


Abbildung 6.5.: FKV Dichte auf E-Modul aufgetragen (Ashby 2012)

	Anteil Fasern 45%	Anteil Fasern 50%	Anteil Fasern 47,5%
Dichte $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1.380	1.380	1.380
E-Modul $\left[\frac{N}{m^2}\right]$	23,5	30,9	27,2
Preis $\left[\frac{EUR}{kg}\right]$	38,10	62,60	50,35

Tabelle 6.3.: Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit des Mengenverhältnisses Faser zu Matrix am Beispiel des Werkstoffes Epoxidmatrix mit Aramidfaser verstärkt als unidirektionales Composite (Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate)

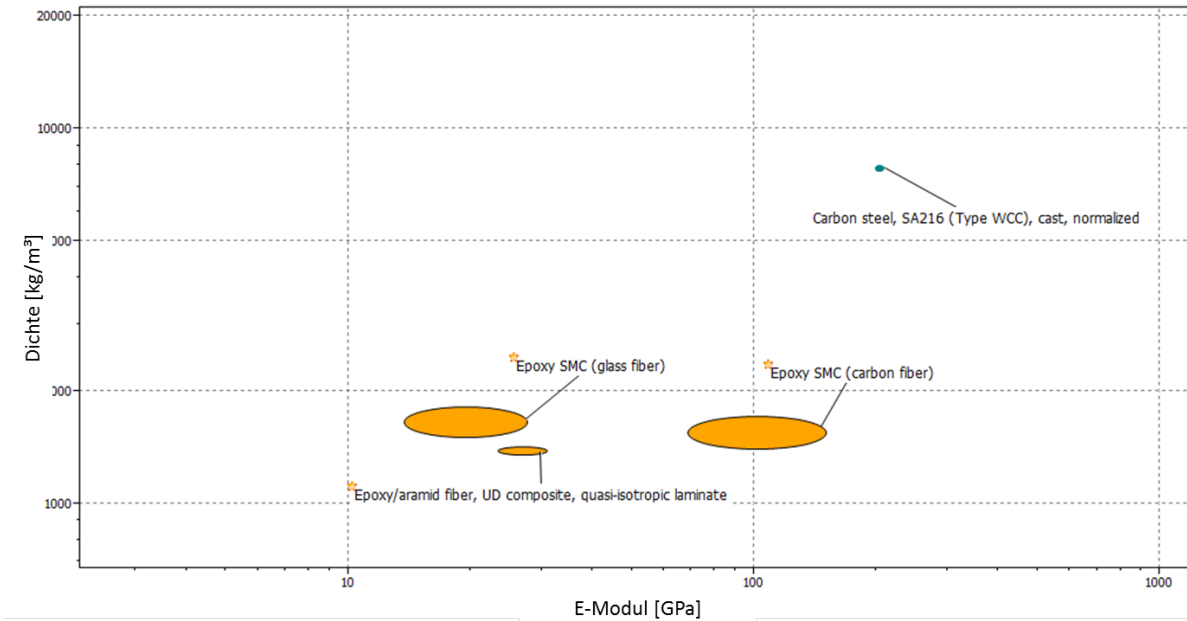


Abbildung 6.6.: Metall im Vergleich zu FKV  
(Ashby 2012)

zu können, werden nun in einem zweiten Schritt Grenzwerte für die Dichte und den E-Modul festgelegt.

Bzgl. des E-Moduls muss ein unterer Grenzwert bestimmt werden, welcher nicht unterschritten werden darf. Der E-Modul des bisher eingesetzten Werkstoffes Stahl beträgt ca.  $E = 210.000 \frac{N}{mm^2}$ . Abbildung 6.5 zeigt auf, dass FKV einen E-Modul bis ca.  $E = 150.000 \frac{N}{mm^2}$  aufweisen. Folglich sind FKV bzgl. ihrer Steifigkeit nicht vergleichbar mit Stahl. Dies muss durch erhöhten Materialeinsatz bzw. mit einer Formoptimierung kompensiert werden.

Bzgl. der Dichte muss ein oberer Grenzwert definiert werden, welcher nicht überschritten werden darf. Die Dichte ist definiert als Masse pro Volumen. Je leichter ein Material, desto geringer die Dichte. Stahl hat eine Dichte von ca.  $\rho = 7.850 \frac{kg}{m^3}$ . Demgegenüber gibt es FKV, die eine Dichte von  $\rho = 1.100 \frac{kg}{m^3}$  aufweisen. In Abbildung 6.5 ist jedoch auch zu erkennen, dass diese Werkstoffe einen äußerst geringen E-Modul aufweisen. Dies ist ein wichtiges Indiz dafür, dass der Werkstoff die Belastungen, die im Betrieb eines RBG auftreten, nur durch extrem hohen Materialeinsatz widerstehen können. Dies kann dazu führen, dass durch den hohen Einsatz an Material das Gewicht des FVW-Bauteils über dem des vergleichbaren Bauteils aus Stahl liegt. Abbildung 6.6 veranschaulicht die Unterschiede zwischen Metall und ausgewählten FKV. Das zum Teil nur leicht höhere E-Modul bei Stahl im Vergleich zum FKV geht mit einer deutlich höheren Dichte einher.

## 6. Werkstoffauswahl

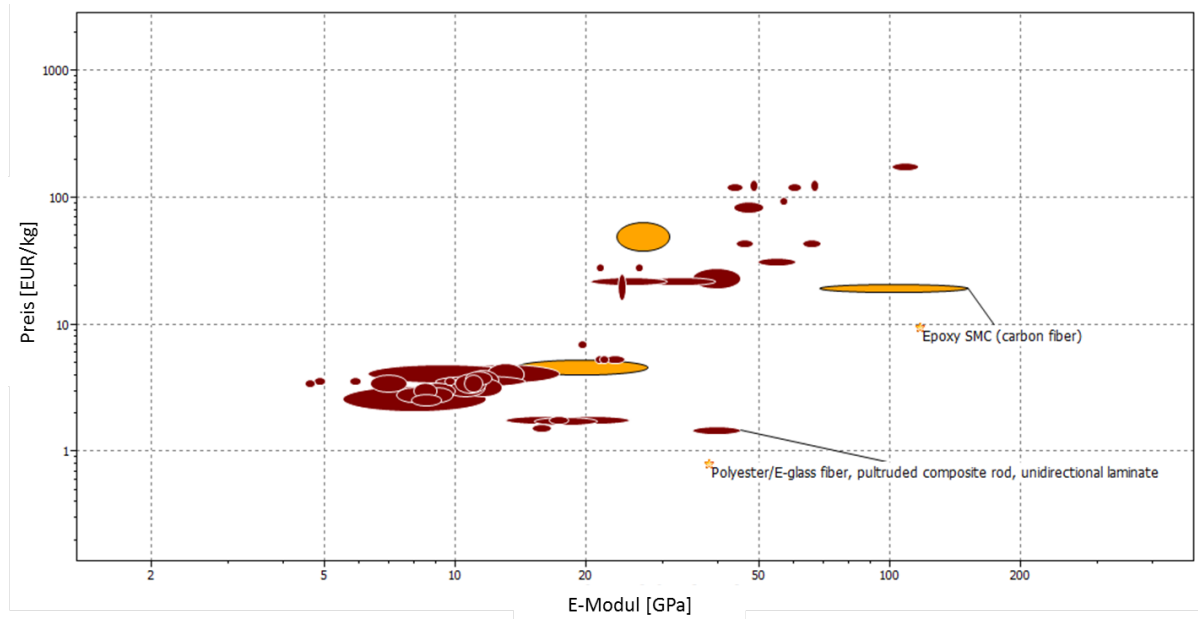


Abbildung 6.7.: FKV E-Modul zu Preis  
(Ashby 2012)

### Werkstoffbestimmung

Ausgangsbasis sind die in Anhang C.1 bzw. in Abbildung 6.5 angegebenen 51 Werkstoffe. Ziel ist es, einen leichten Werkstoff zu finden. Folglich muss die Dichte klein sein. In einem ersten Schritt werden die 51 FKV entsprechend ihrer Dichte geordnet. Für eine nun folgende erste Vorauswahl wird ungefähr die Hälfte der Werkstoffe aussortiert. Dazu wird der Wert der Dichte, welcher bei der Hälfte der Werkstoffe liegt, als Grenze angesetzt. Dies bedeutet eine maximale Dichte von  $1.800 \frac{kg}{m^3}$ . Somit bleiben 27 FKV übrig. Abbildung 6.7 zeigt die übrig gebliebenen FKV im Verhältnis des E-Moduls und Preises. Um den Materialeinsatz aufgrund der benötigten Steifigkeit niedrig halten zu können und die Anzahl der im Fokus stehenden Materialien einzugrenzen, wird die untere Grenze des E-Modul willkürlich auf  $50.000 \frac{N}{mm^2}$  festgelegt. Übrig bleiben damit die in Tabelle 6.4 sowie in Abbildung 6.8 dargestellten Materialien, sortiert nach dem durchschnittlichen Preis.

### Gegenüberstellung der Kosten

Anhang C.1 zeigt die Auflistung der ausgewählten FKV. Abbildung 6.9 zeigt die ausgewählten Werkstoffe, wobei der Preis in Abhängigkeit der Dichte dargestellt ist. Abbildung 6.10 zeigt den Preis in Abhängigkeit des E-Modul.

Hier ist zu erkennen, dass die Epoxidharzmatrix mit Kohlenstofffasern als Verstärkungsphasern im Vergleich zu den anderen dargestellten Materialkombinationen einen durchschnittlichen Preis aufweist. Aus diesen Gründen (E-Modul sowie Kosten) wird

Name	Preis [ $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$ ]	Dichte [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]	E-Modul [ $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ ]
Epoxy (carbon fiber)	19,55	1.550	109.500
Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	31,45	1.565	54.900
Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial lamina	44,40	1.575	65.700
PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	94,65	1.650	56.600
Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial laminate	121,00	1.610	60.200
BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial laminate	125,50	1.540	67.000
Cyanate ester/HM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate	177,00	1.645	108.000

Tabelle 6.4.: Endaufstellung der FKV (Ashby 2012)

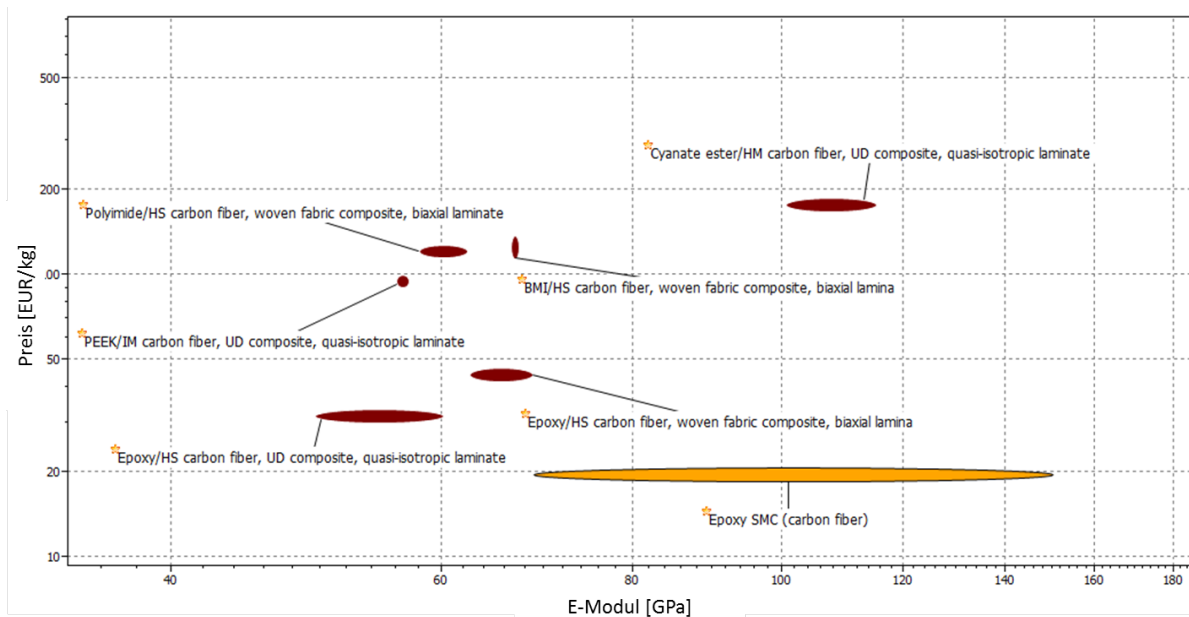


Abbildung 6.8.: Endauswahl FKV (Ashby 2012)

## 6. Werkstoffauswahl

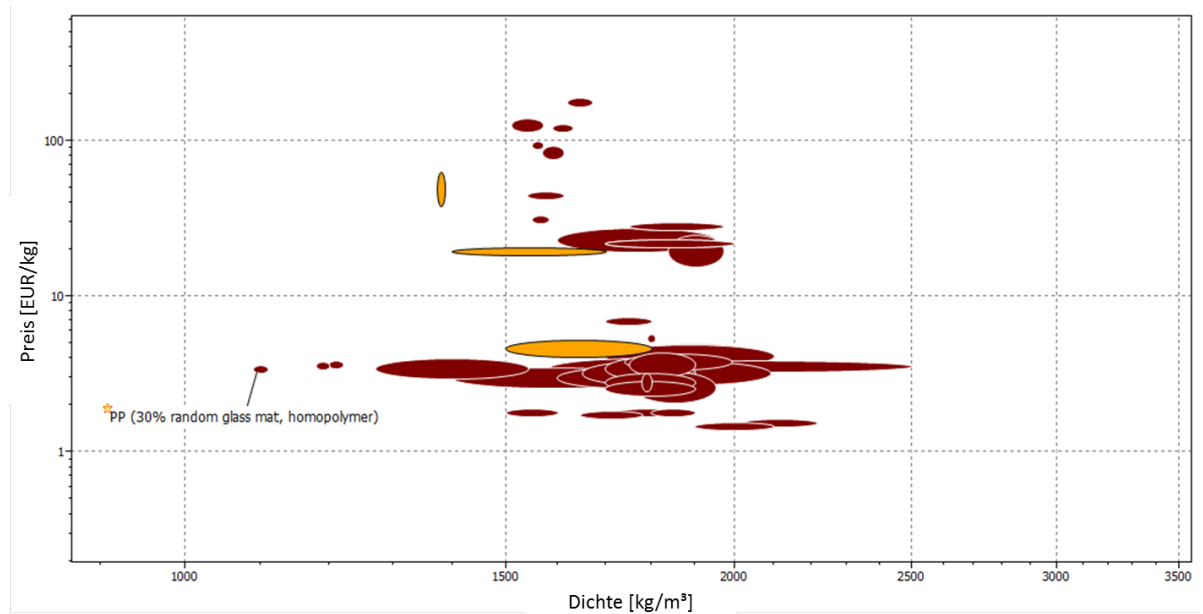


Abbildung 6.9.: FKV Preis zu Dichte  
(Ashby 2012)

dieser Werkstoff für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

### 6.3. Zusammenfassung des ausgewählten Materials

Nachfolgend wird der ausgewählte Werkstoff weiter detailliert bzw. die ausgewählte Werkstoffkombination vorgestellt. Er besteht aus Kohlenstofffasern, eingebettet in einer Epoxidharzmatrix, hergestellt mittels des Pultrusionsverfahrens. In Anhang D sind detaillierte Werkstoffkennwerte angegeben. Nachfolgend wird der Aufbau des Materials beschrieben.

#### 6.3.1. Kohlenstofffasern

Als Ausgangsbasis für Kohlenstofffasern eignen sich nach (Ehrenstein 2006) folgende Materialien:

**Zellulose** weist eine gering geordnete Struktur auf und Fasern aus Zellulose werden überwiegend als thermische Isolierwerkstoffe eingesetzt.

**Polyacrylnitril(PAN)** wird seit 1980 verstärkt eingesetzt und bildet heute das Standardausgangsmaterial. Die Herstellung von Kohlenstofffasern aus PAN wird mittels drei Stufen ermöglicht. Zu Beginn (Stufe 1) wird bei ca. 200 – 300 °C über ein Oxidationsprozess und unter mechanischer Spannung eine Orientierung der Moleküle entlang der Faserachse erreicht. Daran anschließend wird bei ca. 1.300 °C

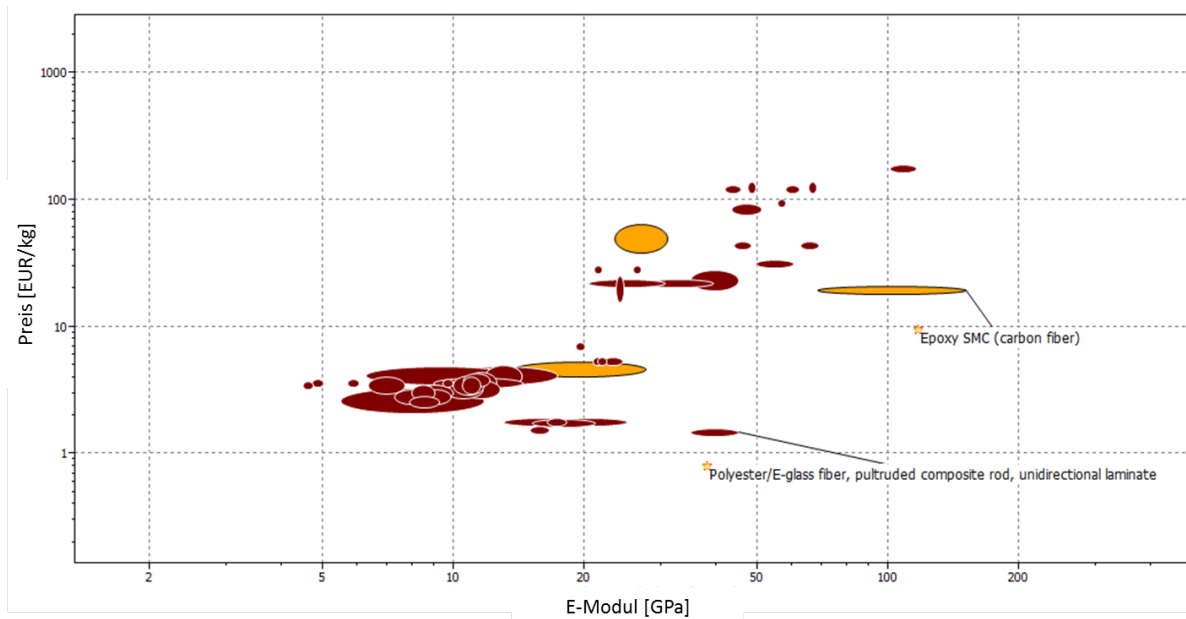


Abbildung 6.10.: FKV Preis zu E-Modul  
(Ashby 2012)

eine Graphitstruktur ausgebildet, welche parallel zur Phaserachse ausgerichtet ist. Dadurch besitzen die Fasern eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit. Mit einer abschließenden Wärmebehandlung kann die Steifigkeit weiter erhöht werden. Dabei verringert sich jedoch die Festigkeit.

Besondere Eigenschaften der Kohlenstofffasern sind:

- Hohe Festigkeit und Steifigkeit bei Temperaturen von bis zu 500 °C
- Korrosionsbeständig
- Elektrisch und thermisch hemmend
- Äußerst spröde und ohne Oberflächenschutz knickempfindlich

**Pech** besitzt einen geringen Marktanteil. Das günstige Pech muss durch kostenintensiven Aufbereitungsmethoden behandelt werden, um Kohlenstofffasern herzustellen. Fasern aus Pech besitzen eine hohe Steifigkeit.

### 6.3.2. Epoxidharz als Matrix

Epoxidharze sind hochwertige Duromere mit hoher Maßhaltigkeit und guten mechanischen Eigenschaften (Ehrenstein 2006). Besondere Eigenschaften des Epoxidharzes sind sehr gute dynamische und mechanische Eigenschaften sowie eine gute Temperaturbeständigkeit. Epoxidharze bestehen aus Harz- und Härtermolekülen, die bei der Herstellung in strengem stöchiometrischen Verhältnis gemischt werden. Die Matrix besitzt in

## *6. Werkstoffauswahl*

diesem FKV drei zentrale Aufgaben. Zum einen sollen so die Fasern in der entsprechenden Lage fixieren werden. Des weiteren sollen die Fasern vor äußeren Umwelteinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) und vor äußeren mechanischen Belastungen (z.B. Stöße, Überrollen) geschützt werden.



# 7. Substitution

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen lässt erwarten, dass durch die damit verbundene Gewichtseinsparung entweder ein wesentlich geringerer Energiebedarf bei gleichbleibender Bewegungsdynamik oder aber eine deutlich größere Dynamik bei gleichbleibendem Energiebedarf erzielt werden kann. Die Energiebilanz wird grundsätzlich verbessert.

Der Mast des RBG wurde bereits als mögliches, zu substituierendes Bauteil erkannt. In Abbildung 5.1 in Kapitel 5.2 ist die Funktionsstruktur für ein Regalbediengeräte-Mast zu sehen. Diese Funktion wird durch das Material, die Form und den Aufbau des Mastes erfüllt.

## 7.1. Auswahl der Mastgeometrie

Das I-Profil mit konstantem Querschnitt, ausgeführt als Pultrusionsprofil, ist dem Vergleichsmast am ähnlichsten. Für die Wahl des Querschnitts wird angenommen, dass der Mast wie der Vergleichsmast in Abschnitt 5.2 und 5.3 belastet wird. Die größten Lasten auf den Mast treten beim Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgang in Schienenrichtung auf. Andere Belastungen sind dagegen klein. Der Mast muss also sehr steif um die z-Achse sein, um die geforderte maximale Mastauslenkung gemäß Abschnitt 5.2 nicht zu überschreiten.

Um dies zu bewerten wurde in Kapitel 6.1.1 der Formfaktor eingeführt. Dieser dient dazu, Bauformen hinsichtlich ihrer Eignung bezüglich bestimmter Belastungsarten zu vergleichen. Bei einem höheren Formfaktor werden die Eigenschaften des Werkstoffes besser genutzt, folglich ist ein Querschnitt mit einem hohen Formfaktor zu wählen (Reuter 2007). Nach Kapitel 6.1.1 lautet die Definition des Biegeformfaktors

$$\phi = \frac{EI}{EI_0} \quad (7.1)$$

Ein möglichst hoher Faktor bei gegebener Querschnittsfläche wird dadurch erreicht, dass sich das Material möglichst weit von der Mittelachse entfernt befindet. Die Gefahr des Beulens, des Knickens und der Verdrehung/Torsion sowie Fertigungsrestriktionen begrenzen die Wahl des Querschnitts. Abbildung 7.1 veranschaulicht, dass bei den gegebenen Restriktionen mit dem I-Profil ein hoher Formfaktor bezüglich Biegung um z zu erreichen ist. Es verbleibt möglichst wenig Material im Bereich der Biegeachse z. Es wird zu Beginn festgelegt, dass der Steg eine minimale Wanddicke von 20 mm hat. Nun kann iterativ die Wanddicke der Flansche erhöht werden, bis Gleichung 5.17 erfüllt ist. Abbildung 7.1 zeigt den Querschnitt des Mastes mit einem E-Modul von  $E = 80.000 \frac{N}{mm^2}$

## 7. Substitution

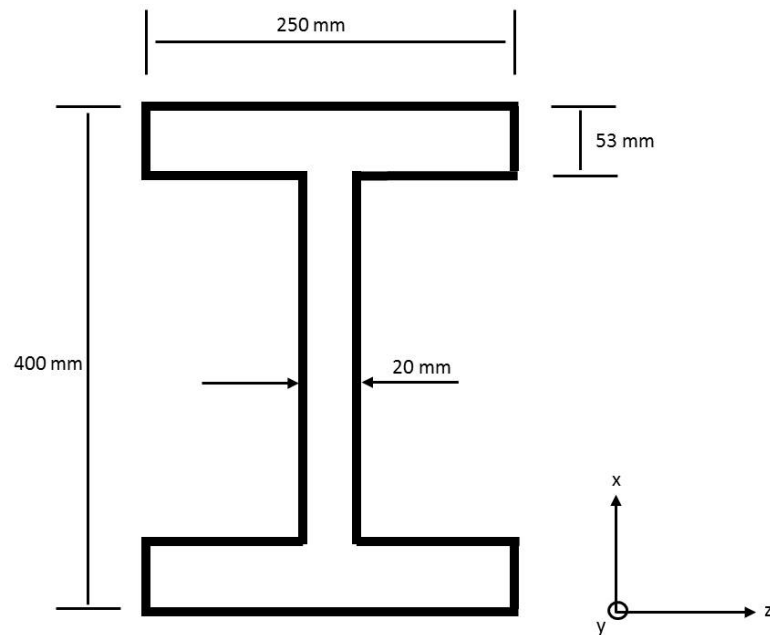


Abbildung 7.1.: Darstellung des Querschnittes des Pultrusionsprofils

und einer Dichte von  $\rho = 1.440,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Mit dieser Form hat der Mast ein Flächenträgheitsmoment um  $z$  von  $I_{ZZ} = 848,45 \cdot 10^{-6} \text{m}^4$ . Die Berechnung erfolgte analog Kapitel 5.3.

Auf dieser Basis kann die Auslenkung der Mastspitze analytisch für gleiche Belastungen wie in Tabelle 5.6 berechnet werden. Analog der Berechnungen in Kapitel 5.3 beträgt die Auslenkung für das Flächenträgheitsmoment dieses Querschnitts  $w_{max,x} = 20,89 \text{ cm}$ . Somit ist die Bedingung der maximalen Auslenkung angenähert erfüllt. Die Überschreitung von rund 2,8% kann als minimal angesehen und somit akzeptiert werden.

## 7.2. Nachweis der Betriebssicherheit

Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten, müssen die Spannungen innerhalb des Mastes entsprechend den Kräften nach Kapitel 5.2 und der Mastgeometrie bestimmt werden. Hierzu müssen zum einen die Kräfte nach Regellastfall für den normalen Betriebszustand sowie die Kräfte nach Sonderlastfall für den Pufferstoß berücksichtigt werden.

Die Spannung wird in Anlehnung an (Gross 2012, Seite 112ff) nachfolgend bestimmt:

$$\sigma = \frac{M}{W_M} \quad (7.2)$$

Mit  $M$  als angreifendes Moment sowie  $W_M$  als Widerstandsmoment des Bauteils. Hieraus folgt für das Widerstandsmoment  $W_M = 4.231.332,37 \text{ mm}^3$ .

Die größten Kräfte treten am Übergang von Mast zu Fahrwerk auf, ein Versagen des Werkstoffes ist hier am wahrscheinlichsten. Für die Bestimmung des maximal auftretenden

den Momentes in diesem Bereich soll die Kraft  $F_1$  (nach Kapitel 5.2) am oberen Ende des Mastes angreifen. Kraft  $F_2$  wird aus den Massen des Mastes gebildet, somit greift diese in der Mitte des Mastes an.

### Belastung nach Regellastfall

In Anlehnung an Kapitel 5.2 gilt im Regellastfall für  $M$  folgender Zusammenhang:

$$M_R = F_1 \cdot l + F_2 \cdot \frac{1}{2}l \quad (7.3)$$

Hieraus folgt  $M_R = 107.100 \text{ Nm}$ . Mit  $W$  erhält man die auftretende Spannung im Regellastfall

$$\sigma_R = 25,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (7.4)$$

Vergleicht man dies nun mit der Streckgrenze  $R_e = 276 - 345 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  (siehe Anhang D), so erkennt man, dass während des normalen Betriebszustandes das Bauteil nicht versagen wird.

### Belastung nach Sonderlastfall

Der Sonderlastfall wird mit den entsprechenden auftretenden Kräften des Pufferstoßes analog zum Regellastfall berechnet. Somit gilt für  $M$  folgender Zusammenhang:

$$M_S = F_{1P} \cdot l + F_{2P} \cdot \frac{1}{2}l = 321.300 \text{ Nm} \quad (7.5)$$

Mit  $W_M$  ergibt dies für die Spannung

$$\sigma_R = 75,93 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (7.6)$$

Vergleicht man dies ebenfalls mit der Streckgrenze  $R_e = 276 - 345 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , so ist auch während des Pufferstoßes ein Versagen des Bauteils nicht zu erwarten.

## 7.3. Oberflächenbelastung durch Überrollen

Wenn die auf den Laufflächen der Hubwagenräder auftretenden Flächenpressungen hinreichend klein sind, kann auf zusätzliche Fahrbahnen aus Stahl verzichtet werden. Dies würde die Konstruktion und Herstellung vereinfachen und auch Gewicht einsparen. Folglich soll dieser Betrachtungsfall entsprechend untersucht werden.

Nach (Wittel, Muhs, Jannasch, and Voßiek 2013) berechnet sich die Hertzsche Pressung zwischen zwei Zylindern nach

$$p_H = \sqrt{\frac{F_N \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l}} \quad (7.7)$$

## 7. Substitution

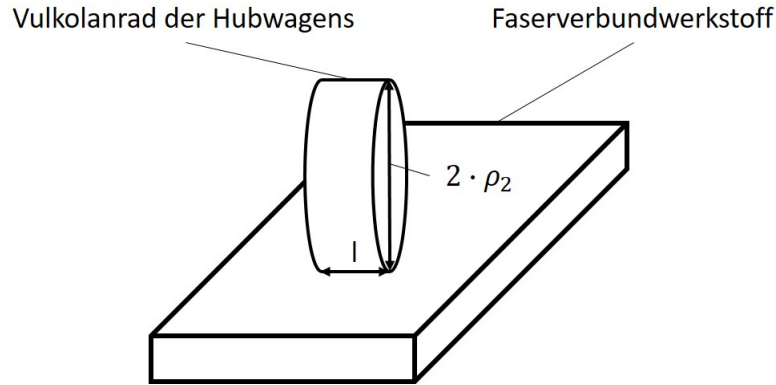


Abbildung 7.2.: Überrollen eines Rades auf einer Ebene

wobei  $l$  die Länge des Linienkontaktes ist und  $F_N$  die Normalkraft zwischen den zwei Körpern.  $\rho$  ist ein Ersatzradius, bestimmt aus den Radien der Zylinder, und  $E$  ein Ersatz-E-Modul, bestimmt aus den E-Moduln der beiden Zylinder.  $\rho$  und  $E$  berechnen sich nach

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (7.8)$$

und

$$E_{res} = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{(1 - \nu_1^2) \cdot E_2 + (1 - \nu_2^2) \cdot E_1} \quad (7.9)$$

Diese Gleichungen können auch bei Kontakt eines Zylinders auf einer Ebene verwendet werden (vgl. Abbildung 7.2). Dann ist der Radius für die Ebene unendlich. Ist "1" der Faserverbundwerkstoff und "2" das Vulkolanrad des Hubwagens, wird aus Gleichung 7.8 mit  $\rho_1 \rightarrow \infty$

$$\rho = \rho_2 \quad (7.10)$$

Der Durchmesser für ein Vulkolanrad wird mit  $123 \text{ mm}$  (Radius von  $61,5 \text{ mm}$ ) angenommen. Vulkolan hat eine Härte von 93 Shore A. Nach (Kunz and Studer 2006) besteht für Elastomere mit einer Shore-A-Härte von 30 bis 95 zwischen dem E-Modul und der Shore-A-Härte folgender Zusammenhang

$$E = \frac{1 - \mu^2}{2 \cdot R \cdot C_3} \cdot \frac{(C_1 + C_2) \cdot Sh_A}{100 - Sh_A} \cdot (2,6 - 0,02 \cdot Sh_A) \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right] \quad (7.11)$$

Hier ist  $R = 0,395 \text{ mm}$ ,  $C_1 = 0,549 \text{ N}$ ,  $C_2 = 0,07516 \text{ N}$ ,  $C_3 = 0,025 \text{ N}$  und  $\mu = 0,5$ . Es ergibt sich für den angegebenen Shore-A-Wert damit ein E-Modul für den Vulkolanreifen von  $E = 30.265 \frac{N}{\text{mm}^2}$ . Für die Querkontraktionszahl des Vulkolanreifens wird in Anlehnung an (Möhler 1995)  $\nu = 0,4$  angenommen. Der Faserverbundwerkstoff hat ein E-Modul von  $E_1 = 80.000 \frac{N}{\text{mm}^2}$  und eine Querkontraktionszahl von  $\nu_1 = 0,22$ .

Mit Gleichung 7.10 ist der resultierende Radius  $\rho = 61,5 \text{ mm}$ . Der resultierende E-Modul aus Gleichung 7.9 beträgt  $E_{res} = 50,442 \frac{N}{\text{mm}^2}$ . Drückt eine Normalkraft von  $6.300 \text{ N}$  auf das Rad ergibt sich nach Gleichung 7.7 eine Flächenpressung von  $p_H = 4,54 \frac{N}{\text{mm}^2}$ . Dies kann als unkritisch für das Material angesehen werden.

## 7.4. Beschreibung des RBG mit substituiertem Mast

Als Mast wurde ein I-Profil festgelegt. Das Herstellungsverfahren ist die Pultrusion. Weiter wurde gezeigt, dass die maximale Auslenkung im Regelbetrieb der Auslenkung des Vergleichsmastes ähnelt. Die im Einsatz auftretenden Spannungen bleiben unterhalb der Streckgrenze, womit ein Versagen des Bauteils ausgeschlossen werden kann.

Auf Basis der Geometrie (vergleiche Abbildung 7.1) kann nun das Gesamtgewicht des Mastes bestimmt werden. Mit den in Abbildung 7.1 angegebenen Maßen beträgt die Grundfläche des Mastes  $A = 32.380 \text{ mm}^2 = 0,03238 \text{ m}^2$ . Mit einer Höhe von  $h = 17 \text{ m}$  ergibt sich ein Materialvolumen von  $V = 0,55046 \text{ m}^3$ . Das Volumen multipliziert mit dem spezifischen Gewicht des ausgewählten Werkstoffes (Kapitel 6.3) von  $\rho = 1.440,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ergibt eine Masse für den Mast von

$$m_{Mast} = 792,94 \text{ kg} \quad (7.12)$$

Mit den Massenangaben aus Tabelle 5.2, Kapitel 5 und der Masse aus Gleichung 7.12 ergibt sich eine Gesamtmasse des RBG zu

$$m_{RBG} = 1.807,94 \text{ kg} \quad (7.13)$$

Dies bedeutet gegenüber dem Ausgangsmast mit einem Gewicht von  $m_{RBG,alt} = 2.665 \text{ kg}$  eine Gewichtsersparnis von  $m_{Ersparnis} = 857,06 \text{ kg}$  bzw. 32,16 %.

Werden die Materialkosten verglichen, so ist eine Kostensteigerung zu erkennen. Berücksichtigt man in einem ersten Ansatz gleiche Herstellkosten für beide Mastvarianten, so kostet das Material für den neuen Mast  $K_{neu} = 14.954,85 \text{ EUR}$ . Im Vergleich hierzu liegen die Materialkosten für den Vergleichsmast unter Berücksichtigung eines Materialpreises nach (Ashby 2012) von  $K_{Stahl} = 0,45 \frac{\text{EUR}}{\text{kg}}$  bei  $K_{alt} = 742,50 \text{ EUR}$ .



## 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Einsatz neuer Technologien im industriellen Umfeld muss Vorteile bringen, sonst wird er nicht erfolgen. Die Wirtschaftlichkeit ist dabei ein ausschlaggebendes Kriterium. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, wird durch Minimierung der Masse bei gleichbleibendem Fahrverhalten eine Verminderung des Energieverbrauchs bzw. bei gleichbleibendem Energieverbrauch eine Erhöhung der Fahrdynamik erzielt. Nachfolgend soll dieser Vergleich genauer untersucht werden. Dazu wird eine Bezugsgröße benötigt.

Im Falle des RBG bietet sich das sog. Einzel- bzw. Doppelspiel für einfach tiefe Lagerung an. Diese werden in (FEM 9.851 2003) definiert und die dazugehörigen Berechnungen aufgezeigt. Die im Kleinteilebereich weit verbreitete mehrfach tiefe Lagerung soll nicht weiter betrachtet werden. Im Vergleich zur einfach tiefen Lagerung wird bei der mehrfach tiefen Lagerung das LAM entsprechend der Anzahl der Ladungsträger tiefer in das Regal eingefahren. Der Unterschied liegt dabei ausschließlich bei einer Bewegung in z-Richtung. Weiter ist in Kapitel 5 beschrieben, dass das LAM nicht das Bauteil mit dem größten Potential zur Gewichtsreduzierung ist. Somit ist die Betrachtung dieser Bewegung bezüglich der Gewichtsoptimierung zweitrangig. Des weiteren können mit den Ergebnissen aus der einfach tiefen Lagerung Rückschlüsse auf die doppelt tiefe Lagerung gezogen werden. Berechnungen zur Spielzeit der doppelt tiefen Lagerung sind in (Lippolt 2003) dargestellt.

### 8.1. Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ein Modell soll klären, nach wie vielen Einzel- bzw. Doppelspielen sich ein leichteres Regalbediengerät im Vergleich zu einem existierenden RBG amortisiert. Wie bereits beschrieben, kann eine Wirtschaftlichkeit über die Einsparung von Energie oder über die Erhöhung der Dynamik erzielt werden. Dementsprechend müssen im Modell folgende Vergleiche durchgeführt werden:

- Vergleich von RBG mit aktueller Masse und RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibenden Fahrverhalten;
- Vergleich von RBG mit aktueller Masse und RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibendem Energiebedarf.

Abbildung 8.1 zeigt schematisch den Aufbau des Berechnungsmodells. Um das Modell anwenden zu können, müssen für das aktuelle RBG und für das neu entwickelte RBG spezifische Daten bekannt sein. Mit Hilfe der Berechnungen nach (Braun, Linsel, Schöning, and Furmans 2012) werden der Energieverbrauch (Einzel- und Doppelspiel) für folgende Fälle bestimmt:

## 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

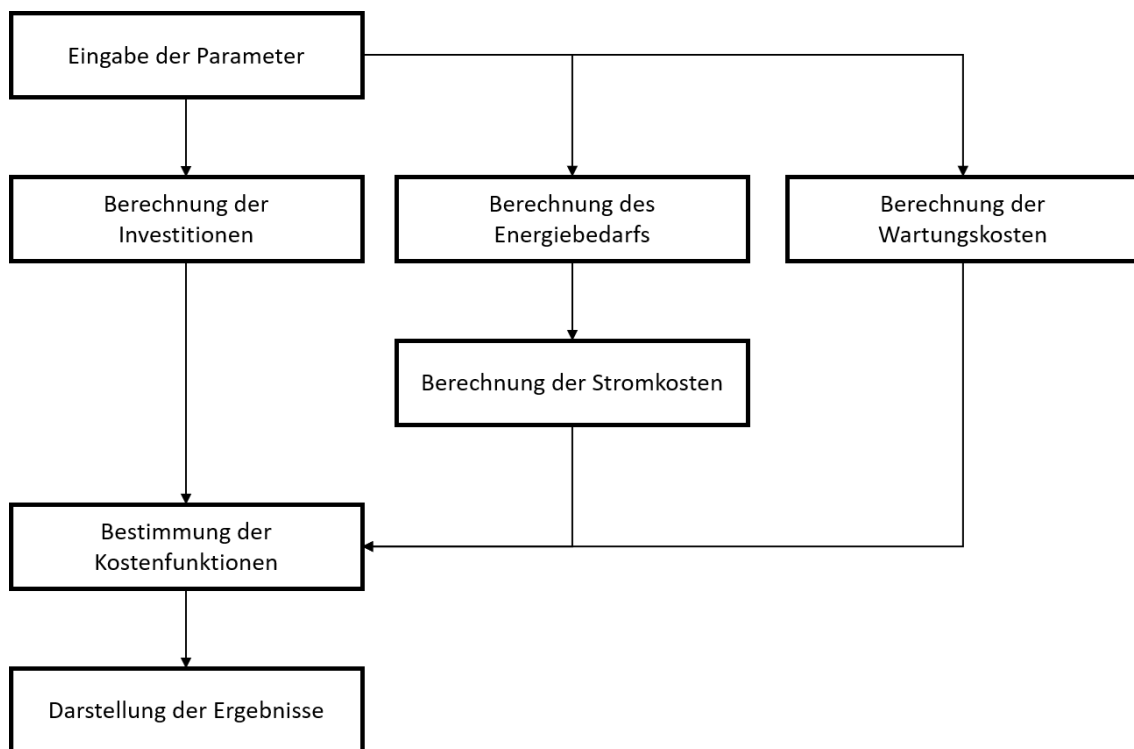


Abbildung 8.1.: Aufbau des Berechnungsmodells

- RBG mit aktueller Masse
- RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibendem Fahrverhalten
- RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibendem Energiebedarf

Auf Basis des Energieverbrauchs und dem zuvor eingegebenen Parameter *Stromkosten* können die Stromkosten pro Spiel bestimmt werden. Weiter können auch die Wartungskosten pro Spiel berechnet werden. Aus den Investitionen kann dann die Abschreibung bestimmt werden. Basierend auf den Wartungskosten, den Stromkosten und der Abschreibung wird die Kostenfunktion für die drei Fälle bestimmt. Die Werte Stromkosten, Masse, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Abmaße der Regalwand und der Investitionen in ein RBG dienen als Eingangsgröße für das Modell. Mit diesen Werten können dann der Stromverbrauch sowie jeder weitere Wert bestimmt werden.

### 8.1.1. Bestimmung der Spielzeit

Die Arbeit von Regalbediengeräten wird über Einzel- und Doppelspiele ausgeführt. Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass der Ein- und Auslagerpunkt sich an der gleichen Stelle befindet, im Regal auf Koordinate (0;0) (Abbildung 8.2). Bei einem Einzelspiel wartet das RBG am Übergabepunkt auf einen Transportauftrag. Erfolgt eine Einlagerung, wird die Ladeinheit am Übergabepunkt vom RBG übernommen.



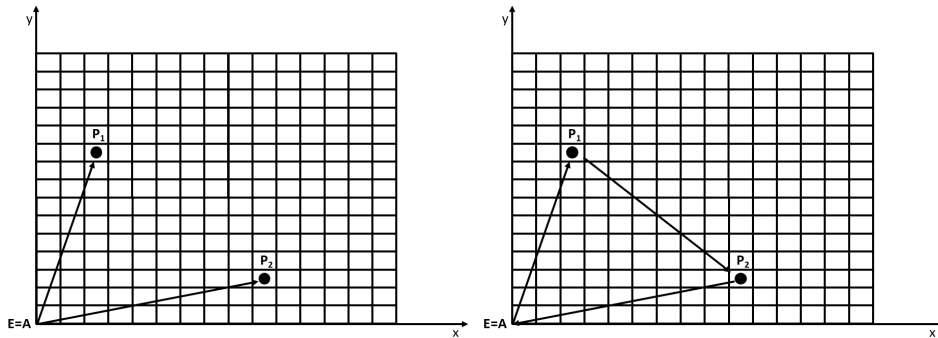


Abbildung 8.2.: Darstellung eines Einzelspiels (links) und eines Doppelspiels (rechts)  
In Anlehnung an (FEM 9.851 2003)

Danach fährt das RBG zu einem zuvor bestimmten freien Regalfach und lagert die Ladeeinheit dort ein. Anschließend fährt das RBG von dieser Position wieder zurück zum Übergabepunkt.

Findet eine Auslagerung in Form eines Einzelspiels statt, läuft der Vorgang in umgekehrter Reihenfolge ab. Der gesamte Hinweg wird als Leerfahrt zurückgelegt, während auf dem Rückweg eine Ladeeinheit zum Übergabepunkt transportiert wird. Findet im gleichen Arbeitsspiel sowohl eine Einlagerung als auch eine Auslagerung statt, wird dies Doppelspiel genannt. Nach einer erfolgten Einlagerung kann das Regalbediengerät unverzüglich ein weiteres Regalfach ansteuern und aus diesem eine Auslagerung tätigen. Für den Fall, dass gleichzeitig mehrere Ein- und Auslagervorgänge vorliegen, ist zu erwarten, dass die Wegezeiten erheblich verkürzt werden können (Arnold and Furmans 2009) und (Günther and Tempelmeier 2012).

### Aufbau des Modells zur Bestimmung der Spielzeit

Die Ein- bzw. Auslagervorgänge eines Regalbediengerätes werden als Arbeitsspiel definiert. Da verschiedene Fächer mit unterschiedlichen Zeiten angefahren werden können, wird die mittlere Spielzeit mithilfe eines mittleren Arbeitsspiels (Arnold and Furmans 2009) bestimmt. Die Norm (FEM 9.851 2003) gibt hierzu eine standardisierte Berechnung mit repräsentativen Ein- und Auslagerfächern vor. Die Spielzeit eines Regalbediengerätes errechnet sich nach dieser Regel aus der Summe konstanter Zeitwerte und veränderlicher Wegezeiten. Konstante Zeitwerte sind die Zeiten für Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- und Kontrollvorgänge und das Gabelspiel. Sie sind abhängig von den spezifischen Daten der RBG sowie den Wegstrecken in x-, y- und z-Richtung. Um die mittlere Spielzeit errechnen zu können, muss die Annahme getroffen werden, dass die gesamten Fächer der Regalfläche über einen bestimmten Zeitraum betrachtet gleichmäßig angefahren werden. Stellvertretend für jedes annehmbare Arbeitsspiel wird ein mittleres Spiel definiert. Nach (FEM 9.851 2003, Seite 3) ist eine genaue Berechnung der durchschnittlichen Spielzeit erheblich aufwändiger und die Praxis hat gezeigt, dass sich die heuristische Verwendung eines mittleren Spiels bewährt hat. Sie ermöglicht eine gute Annäherung an den genauen Mittelwert.

Beschreibung	Index
Maximaler Hubweg	$H$
Maximaler Fahrweg	$L$
Maximale Hubgeschwindigkeit	$v_y$
Maximale Fahrgeschwindigkeit	$v_x$
Theoretischer Bezugspunkt für Einlagerung	$P_{1(E;A)}$
Theoretischer Bezugspunkt für Auslagerung	$P_{2(A;E)}$
Übernahmeposition für Einlagerung	$E$
Übernahmeposition für Auslagerung	$A$
Bewegungszeit zwischen 2 Punkten	$t$
Summe aus den konstanten Zeitwerten beim Einzelspiel	$t_{01}$
Summe aus den konstanten Zeitwerten beim Doppelspiel	$t_{02}$

Tabelle 8.1.: Eingabeparameter für Wirtschaftlichkeitsmodell

Vor Ermittlung der mittleren Spielzeit muss der Wandparameter A wie folgt berechnet werden:

$$A = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (8.1)$$

Dabei ist H der maximale Hubweg, L der maximale Fahrweg,  $v_y$  die maximale Hubgeschwindigkeit und  $v_x$  die maximale Fahrgeschwindigkeit. Um aussagefähige Werte bzgl. der mittleren Spielzeit zu erhalten, sollten die Grenzen nach (FEM 9.851 2003, Seite 3)  $0,5 < a < 2$  nicht unter- bzw. überschritten werden.

Für die Berechnung der mittleren Spielzeit je Einzel- bzw. Doppelspiel, wie sie im erstellten Rechenmodell vorgesehen ist, müssen die Parameter aus Tabelle 8.1 gegeben sein. Mit der Annahme der Ein- und Auslagerung am unteren linken Eck der Regalwand ergibt sich nach (FEM 9.851 2003, Seite 7) folgende Zeitanteile für die Spielzeit für das Einzelspiel

$$t_{Einzel} = \frac{1}{2} \cdot (t_{P_1} + t_{P_2}) + t_{01} \quad (8.2)$$

sowie für das Doppelspiel

$$t_{Doppel} = t_{P_{1(E;A)}, P_{2(A;E)}} + t_{02} \quad (8.3)$$

### 8.1.2. Aufbau der Kostenfunktion

Die Kosten werden je für ein Einzel- und Doppelspiel berechnet. Dazu müssen die laufenden Kosten des RBG im Betrieb bestimmt werden. Nachfolgend ist die Funktion für die laufenden Kosten, multipliziert mit der Anzahl an Einzel- oder Doppelspielen, angegeben.

$$K_{Betrieb}(x) = (K_{Strom} + K_{Wartung}) \cdot x_{Spiel} \quad (8.4)$$

- *K-Strom*: Die Stromkosten werden aus den Kosten für den Strom pro Wattstunde ( $P_{Strom}$ ) multipliziert mit dem Verbrauch pro Spiel ( $E_{Spiel}$ ) (Einzel- bzw. Doppelspiel) bestimmt. Der Stromverbrauch pro Spiel wird mittels der Fächer für die Spielzeit über ein separates Modell bestimmt und hier als Eingabewert angegeben. (Braun, Linsel, Schöning, and Furmans 2012)

$$K_{Strom, Spiel} \left[ \frac{EUR}{Spiel} \right] = E_{Spiel} \left[ \frac{Wh}{Spiel} \right] \cdot P_{Strom} \left[ \frac{EUR}{Wh} \right] \quad (8.5)$$

- *K-Wartung*: Die Wartungskosten sind abhängig von Betriebsdauer und Betriebsart des RBG. Die genauen Wartungskosten lassen sich erst mit dem Betrieb eines RBG bestimmen. Jedoch können im Vorfeld Abschätzungen über die Investitionssumme getätigt werden. Auf Basis von in der Vergangenheit durchgeführten Projekten im Bereich Lagerkonzeption konnte festgestellt werden, dass bei einem Betrieb von ca. 8 Stunden pro Tag die Höhe der Wartungskosten ca. 9% der Investitionssumme pro Jahr betragen. Liegt jedoch ein Betrieb von ca. 20 Stunden pro Tag vor, so erhöhen sich die Wartungskosten auf ca. 11% der Investitionssumme. Ausgehend hiervon gilt folgender Zusammenhang:

$$K_{Wartung, Spiel} \left[ \frac{EUR}{Spiel} \right] = \frac{K_{Wartung, Jahr} \left[ \frac{EUR}{Jahr} \right]}{d \left[ \frac{Tage}{Jahr} \right] \cdot S_{Spiel} \left[ \frac{Spiele}{Tag} \right]} \quad (8.6)$$

Hierbei werden die jährlichen Wartungskosten je Einzel- oder Doppelspiel angegeben.

- *x-Spiel*: Dieser Wert gibt die Anzahl der Einzel- bzw. Doppelspiele an. Für die Darstellung einer Kostenfunktion wird x jeweils bis zu einem vorab definierten Wert hochgezählt.

### Graphische Darstellung der Funktion

Gleichung 8.4 beschreibt die Betriebskosten pro Spiel. Dies hat zur Folge, dass die Geraden nach Gleichung 8.4 für das existierende RBG sowie für ein leichteres RBG graphisch keinen Schnittpunkt aufweisen (siehe Abbildung 8.3).

Um auch graphisch darstellen zu können, wie viel Spiele benötigt werden, bis ein leichteres (aber in der Investition teureres) RBG wirtschaftlicher ist, wird eine Parallelverschiebung der Kostenfunktion um die Investitionssumme (alle anfallenden Kosten vor Inbetriebnahme des RBG) vorgenommen. Gleichung 8.7 zeigt die Erweiterung der Kostenfunktion um die Investitionssumme, Abbildung 8.4 zeigt dies graphisch. Es ist zu erkennen, dass die Steigung der Gleichungen keine Änderungen aufweisen, lediglich der Schnittpunkt auf der Ordinate wurde von 0 auf die jeweilige Investition verschoben.

$$K(x) = K_{Invest} + K_{Betrieb}(x) = K_{Invest} + (K_{Strom} + K_{Wartung}) \cdot x_{Spiel} \quad (8.7)$$

## 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

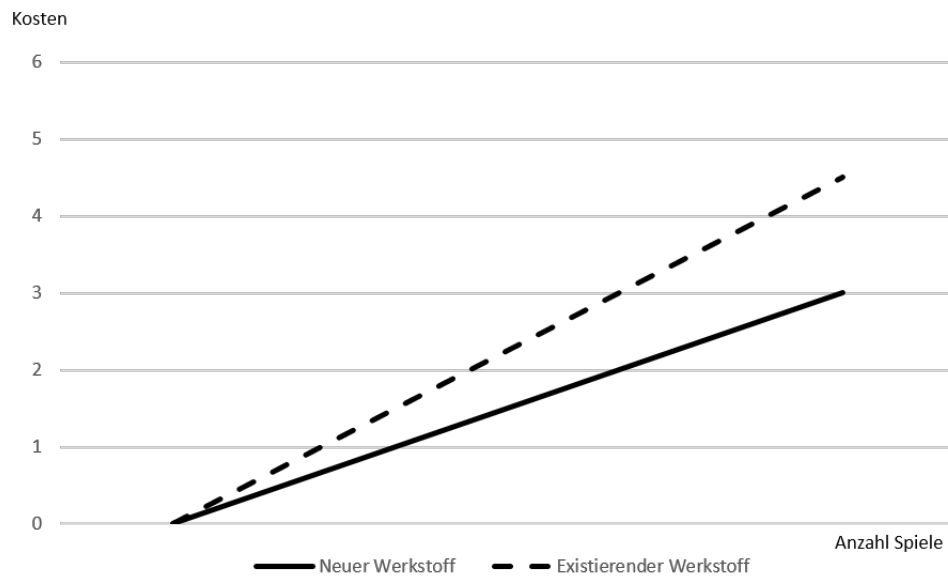


Abbildung 8.3.: Schematische Darstellung Kostenfunktion für die Betriebskosten

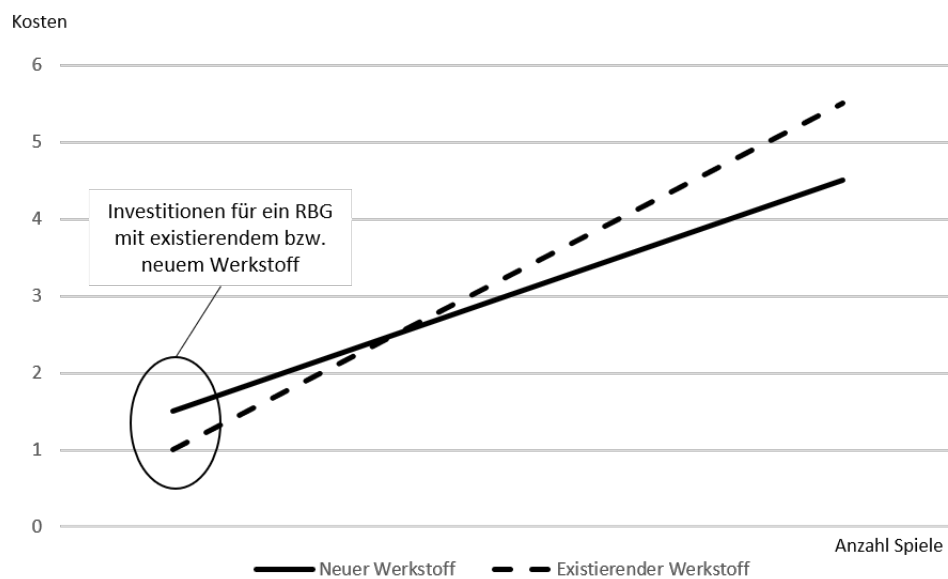


Abbildung 8.4.: Schematische Darstellung der Kostenfunktion für die Betriebskosten; Parallelverschiebung um die Investitionskosten

### 8.1.3. Implementierung des Modells

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen einige Parameter und Rahmenbedingungen bekannt sein. Im implementierten Modell sind diese in vier Teilbereiche unterteilt:

- *Teilbereich 1*: Spezifische Daten eines RBG, welches den aktuellen Stand der Technik abbildet
- *Teilbereich 2*: Spezifische Daten eines RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibenden Fahrverhalten
- *Teilbereich 3*: Spezifische Daten eines RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen und gleichbleibendem Energiebedarf
- *Teilbereich 4*: Gemeinsame Daten, die die drei genannten Teilbereiche betreffen. Zu diesen gemeinsamen Parametern, die für jedes der RBG gelten, gehören maximaler Fahr- und Hubweg, Strompreis und die Anzahl Arbeitstage im Jahr.

In Anhang G sind die Tabellen der jeweiligen Teilbereiche dargestellt. Angaben zum Gewicht des RBG sind ausschließlich dazu nötig, anhand des separaten Modells (vgl. (Braun, Linsel, Schönung, and Furmans 2012)) den Energiebedarf zu ermitteln. Dieser muss anschließend, wie Entwicklungskosten, Investitionskosten und Wartungskosten, in die entsprechende Tabelle eingetragen werden. Der Parameter *Anzahl Einzel- bzw. Doppelspiele pro Tag* muss für die Kostenberechnungen vorab ermittelt werden und wird nicht direkt in die Eingabemaske eingetragen. Dazu werden zuerst die Spielzeiten für Einzel- und Doppelspiel berechnet. Daraus kann nun mit Hilfe der möglichen Betriebszeit des RBG und einer einfachen Division die maximale Anzahl an Einzel- bzw. Doppelspielen ermittelt werden. Multipliziert mit dem Anteil an tatsächlicher Betriebszeit eines RBG pro Tag ergibt sich die gesuchte Anzahl an Einzel- bzw. Doppelspielen pro Tag.

## 8.2. Validierung des Modells

Nach Erstellung eines Modells muss dieses entweder anhand eines realen Systems oder eines weniger abstrakten Modells validiert werden. Für die Validierung des erstellten Rechenmodells steht kein vergleichbares Modell zur Verfügung, sodass es an einem realen System angewandt werden muss. Hierfür sind jedoch einige Annahmen zu treffen. Die für dieses reale System zusammengetragenen und teilweise angenommenen Eingabeparameter sind im Anhang F dargestellt. Bevor mit der eigentlichen Validierung begonnen werden kann, sind an dieser Stelle zuerst einige verwendete Parameter zu erläutern.

Parameter für Teilbereich 1 sind Werte, welche den Stand der Technik abbilden. Darauf aufbauend konnten für die weiteren Teilbereiche benötigte Werte abgeleitet werden. Aus Teilbereich 1 wurden sowohl Nutzungsdauer und Wartungskosten sowie die Parameter, die bei der Spielzeitberechnung nötig sind, für die weiteren Teilbereiche übernommen. Nutzungsdauer und Wartungskosten können aufgrund der gleichen Verschleißteile

## 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

für alle Teilbereiche übernommen werden. Alle die Spielzeit betreffenden Parameter können aus Teilbereich 1 zu Teilbereich 2 übertragen werden, da Teilbereich 2 das gleichbleibende Fahrverhalten behandelt. Bei der Gesamtgewichtsangabe und den Investitionskosten handelt es sich für die Validierung um Schätzwerte von im Markt erhältlichen RBG. Diese Schätzwerte sowie Nutzungsdauer und Wartungskosten können nun ebenfalls in Teilbereich 3 übernommen werden. Auch Tot- und Greifzeit können für die Spielzeitberechnung übernommen werden. Allerdings müssen Fahr- und Hubgeschwindigkeit in Teilbereich 3 so gewählt werden, dass sich ein annähernd gleicher Energiebedarf wie in Teilbereich 1 ergibt, um die Forderung *gleichbleibender Energiebedarf* einzuhalten. Für die Validierung der Ergebnisse des Rechenmodells können Vermutungen über das erwartete Ergebnis aufgestellt werden. Es ist nicht möglich, die im Modell errechneten Kosten mit realen Kosten zu vergleichen, da hierzu keine Daten vorliegen. Im Folgenden werden daher die Vermutungen und Ergebnisse mit Blick auf entscheidende Berechnungsschritte detailliert betrachtet. Für die Validierung werden ausschließlich die Berechnungen bezüglich der Einzelspiele betrachtet, da sie sich nur unwesentlich von den Doppelspielberechnungen unterscheiden.

### **Betrachtung der vor dem Einsatz anfallenden Kosten**

Für die vor dem Einsatz anfallenden Kosten, die aus Entwicklungs- und Investitionskosten bestehen, wird angenommen, dass sie aufgrund der gewichtsreduzierenden Maßnahmen in Teilbereich 2 und 3 höher sind als in Teilbereich 1. Außerdem muss dieser Kostenpunkt in Teilbereich 2 und 3 gleich sein, da zwischen diesen Szenarien nur der Betrieb der Regalbediengeräte unterschiedlich ist. Das Regalbediengerät ist gleich. Diese Vermutungen bestätigt das erstellte Rechenmodell:  $K_{Invest}$  beträgt in Teilbereich 1 200.000 EUR und in Teilbereich 2 und 3 220.000 EUR.

### **Betrachtung der Stromkosten**

Wie eben erläutert sind bei gleichbleibendem Fahrverhalten geringere und bei gleichbleibender Leistung Stromkosten in derselben Höhe zu erwarten. Das Rechenmodell berechnet Stromkosten pro Einzelspiel für Teilbereich 1 in Höhe von 0,007 EUR, für Teilbereich 2 in Höhe von 0,005 EUR und für Teilbereich 3 in Höhe von 0,008 EUR. Somit ist die erste Vermutung bestätigt: Die Stromkosten in Teilbereich 2 sind geringer als in Teilbereich 1. Grund für die höheren Stromkosten in Teilbereich 3 sind die geschätzten Geschwindigkeiten des gewichtsreduzierten Regalbediengerätes. Auf Basis des Modells nach (Braun, Linsel, Schönung, and Furmans 2012) ist eine Annäherung des Energiebedarfs der Teilbereiche 1 und 3 möglich. Da dabei eine vollständige Anpassung der Werte jedoch nicht möglich ist, besteht ein geringfügiger Unterschied zwischen den beiden Energiebedarfen und damit auch zwischen den Stromkosten. Da dieser Unterschied jedoch sehr gering ist, kann dies vernachlässigt werden.

### **Betrachtung der Wartungskosten**

Die Wartungskosten werden mit einem Pauschalwert mit Bezug zu den Investitionen geschätzt. Daraus werden die Wartungskosten je Arbeitsspiel berechnet, wodurch die Spielzeit von großer Bedeutung ist. Können mehr Arbeitsspiele pro Tag durchgeführt werden, sind die Wartungskosten je Arbeitsspiel geringer. Da bei den betrachteten Teilbereichen die ersten beiden eine gleiche Fahrdynamik und damit gleiche Spielzeiten besitzen, müssen auch die Wartungskosten gleich sein. Bei Teilbereich 3 ist jedoch mit geringeren Wartungskosten je Spiel zu rechnen, da dieses mit einer kleineren Spielzeit arbeiten soll. Auch diese Vorstellung kann vom Rechenmodell bestätigt werden: Wartungskosten betragen bei Teilbereich 1 und 2 jeweils 0,039 EUR pro Einzelspiel und bei Teilbereich 3 mit den geringeren Spielzeiten 0,033 EUR.

Da die Wartung im Allgemeinen vorbeugenden Charakter besitzt, werden Bauteile teilweise weit vor der Versagensgrenze ausgetauscht. Dies erfolgt in der Regel in fest bestimmten Zeitintervallen, unabhängig von der Anzahl der Spiele. Deshalb kann die hier getroffene Annahme (geringere Wartungskosten bei höherer Leistung aufgrund der pauschal bestimmten Wartungskosten) bestätigt werden.

### **Betrachtung der Abschreibung**

Soll der Abschreibungswert je Arbeitsspiel validiert werden, müssen folgende zwei Punkte berücksichtigt werden: unterschiedliche Investitionen und Spielzeiten der Regalbediengeräte bei gleicher Lebensdauer. Durch die geringeren Investitionen bei gleichen Spielzeiten von Teilbereich 1 im Vergleich zu Teilbereich 2 ist bei Teilbereich 1 ein geringerer Abschreibungswert zu erwarten als bei Teilbereich 2. Nach dem Modellansatz ergibt sich für Teilbereich 1 ein Abschreibungswert von 0,029 EUR je Einzelspiel und für Teilbereich 2 0,029 EUR. Damit ist die erste Vermutung bestätigt. Eine zweite Vermutung ergibt sich für Teilbereich 3. Für den Teilbereich mit gleichbleibendem Energiebedarf ist der geringste Abschreibungswert zu erwarten. Zwar ergeben sich höhere Investitionen als bei Teilbereich 1, aber durch die deutlich geringeren Spielzeiten ist davon auszugehen, dass der Abschreibungswert geringer ist. Demzufolge ist der geringste Wert für Teilbereich 3 feststellbar. Der durch das Rechenmodell bestimmte Wert beträgt 0,027 EUR und bestätigt die zweite Vermutung.

### **Betrachtung der Kostenfunktionen und derer Schnittpunkte**

Zum Abschluss der Validierung sind die Kostenfunktionen und deren Schnittpunkte zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Regalbediengeräte mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen über den Energiebedarf amortisieren und sich Schnittpunkte mit positiven x-Werten ergeben. Dies kann bei den gegebenen Daten nur teilweise bestätigt werden. Zwar ergibt sich für den Schnittpunkt von Teilbereich 1 und 3 ein positiver x-Wert (3 Jahre), für den Schnittpunkt von Teilbereich 1 und 2 jedoch ein negativer (-39,5 Jahre). Dies liegt daran, dass bei dem vorliegendem Rechenbeispiel die Summe der variablen Kosten bei neuartigem Werkstoff und gleichbleibendem Fahrverhalten größer sind als beim aktuell verwendeten Werkstoff und damit die Steigung der Kostengeraden

## 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

von Teilbereich 2 größer ist. Ein Schnittpunkt mit positivem  $x$ -Wert kann im untersuchten Beispiel somit nicht erreicht werden. Hieran ist zu erkennen, dass der Strompreis für den gewählten Teilbereich nicht hoch genug ist, um eine Kosteneinsparung im Betrieb zu erzielen. Kapitel 9 untersucht den Zusammenhang zwischen Wirtschaftlichkeit und Strompreis.



# 9. Bewertung

Auf Basis der in Kapitel 8 entwickelten Sachverhalte sollen nachfolgend verschiedene Szenarien aufzeigen, welchen Einfluss gewichtsreduzierende Maßnahmen auf die Wirtschaftlichkeit haben. Zwei Betriebsstrategien werden dazu untersucht:

- Energieeffizienter Betrieb
- Spielzeiteffizienter Betrieb

Um diese Strategien untersuchen zu können, wird ein aussagekräftiges Beispiel und auf andere Formen übertragbare Lagerbauform gewählt. Mit den bereits in Kapitel 5 eingeführten Regalrandbedingungen werden die in Tabelle 9.1 angegebenen Werte definiert. Diese Werte besitzen ihre Gültigkeit, sofern sie nicht als Zielgröße verwendet werden. In den weiteren Betrachtungen wird zur Beurteilung das Doppelspiel herangezogen. Dies stellt im realen Betrieb das häufigste Spiel dar. Des weiteren werden als tägliche Betriebsdauer acht Stunden mit einer Auslastung von 80% angenommen. Die im weiteren Verlauf angegebenen Tages- und Jahresangaben beziehen sich auf diese Betriebsdauer.

Wartungskosten werden aus zwei Gründen nicht berücksichtigt. Zum einen sind die Verschleißteile bei den vergleichenden RBG gleich, es wurde lediglich der Mast ausgetauscht. Zum anderen wird i.d.R. eine vorbeugende Wartung durchgeführt, bei welcher der Wartungszeitraum bei Inbetriebnahme definiert wird. Somit kann in den betrachtenden Fällen die Wartung als vergleichbar angesehen werden.

Beschreibung	Einheit	Wert
Fahrlänge	m	28
Hubhöhe	m	16,5
Geschwindigkeit x-Richtung	$\frac{m}{s}$	5
Beschleunigung x-Richtung	$\frac{m}{s^2}$	1,5
Geschwindigkeit y-Richtung	$\frac{m}{s}$	3
Beschleunigung y-Richtung	$\frac{m}{s^2}$	1,5
Wandparamater	–	~ 1
Abschreibungsdauer	Jahre	15

Tabelle 9.1.: Basisdaten

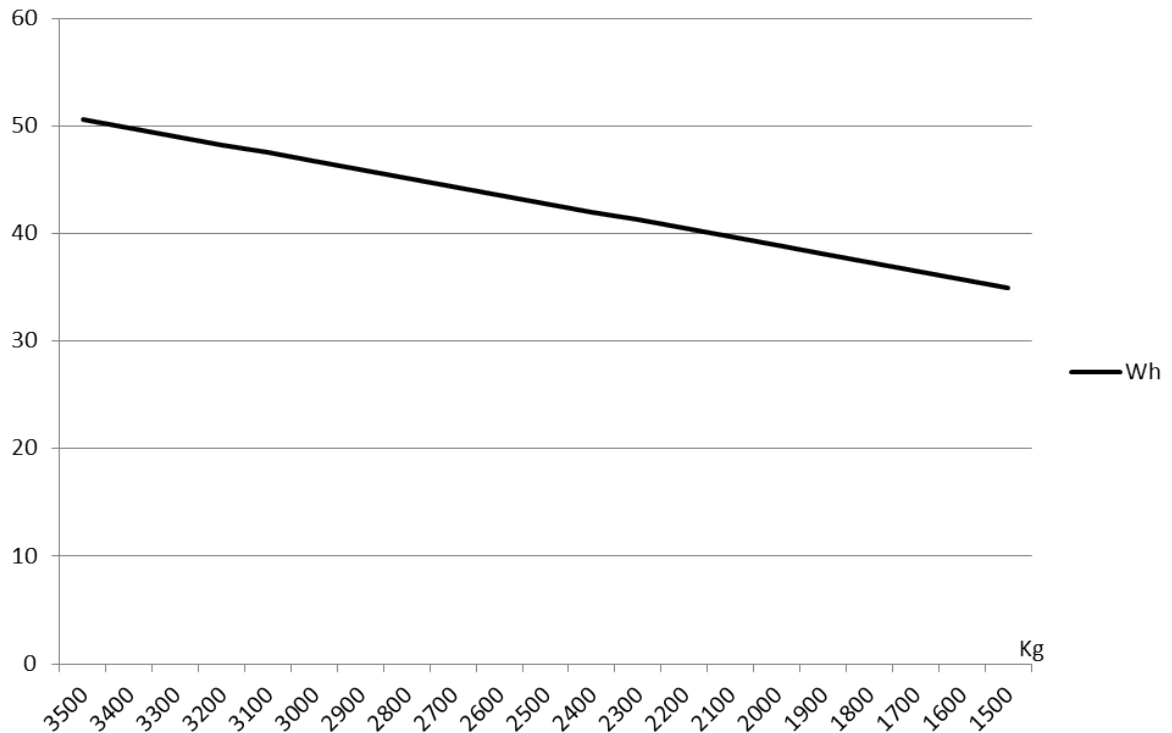


Abbildung 9.1.: Stromverbrauch in Abhängigkeit der Masse

## 9.1. Energieeffizienter Betrieb

Ein energieeffizienter Betrieb spart Energie in Form von Strom ein. Folglich ist der Betrieb eines leichteren RBG in Bezug auf Energie günstiger. Die Herstellung von RBG mit leichteren Materialien im Vergleich zu RBG aus Stahl oder Aluminium ist jedoch in der Regel teurer (vgl. Kapitel 7). Hier stellt sich nun die Frage, um wie viel teurer ein gewichtsreduziertes RBG sein darf, um im laufenden Betrieb die Mehrinvestition aufgrund des niedrigeren Stromverbrauchs zu rechtfertigen. Eine weitere Frage ist, um wie viel der Strompreis sich erhöhen muss, um entsprechende Mehrausgaben der Investition eines RBG zu kompensieren.

### 9.1.1. Konstanter Strompreis

Es wird ein konstanter Strompreis von  $10 \frac{ct}{kWh}$  angesetzt. Eine zulässige maximale Dauer bis zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit wird bei 15 Jahren festgesetzt. Der anzupassende Wert ist die Investition des RBG. Als Ergebnis wird die Zeitspanne angegeben, ab wann die Mehrkosten durch die Stromkosteneinsparung gedeckt sind. Abbildung 9.1 zeigt eine Übersicht über den Stromverbrauch eines RBG bei einem Doppelspiel mit den angegebenen Regalabmessungen und Geschwindigkeitswerten abhängig von verschiedenen Massen des RBG (in Anlehnung an (Braun, Linsel, Schönung, and Furmans 2012)).

Abbildung 9.2 zeigt die Staffelung der Mehrkosten im Vergleich zu einem Gerät mit

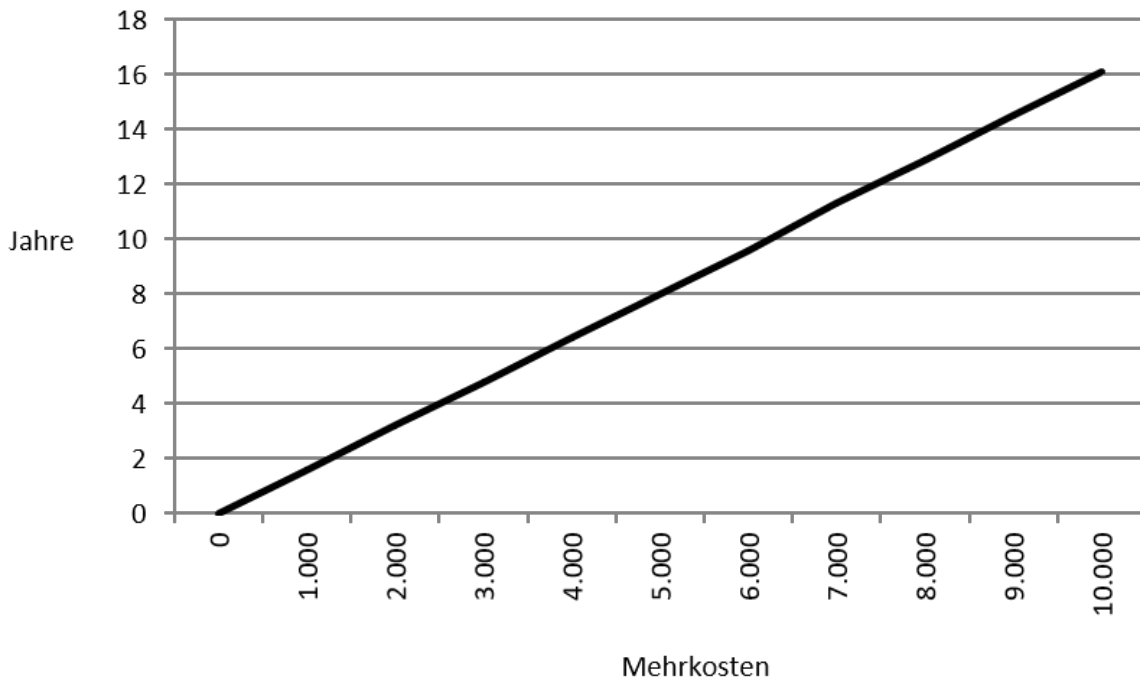


Abbildung 9.2.: Zulässige Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit nach x Jahren

Kosten von 150.000 €. Die Angabe der Jahre bezieht sich auf den Zeitpunkt der gegebenen Wirtschaftlichkeit. Tabelle H.1 und Abbildung H.1 in Anhang H zeigen die detaillierten Werte. Es ist zu erkennen, dass bei Mehrkosten von 10.000 € die Wirtschaftlichkeit nicht mehr während einer Abschreibungsdauer von 15 Jahren erreicht werden kann. Weiter wurde hier als Berechnungsgrundlage ein RBG angenommen, welches im Vergleich zum Ausgangsgerät (Gesamtmasse 3.500 kg) um 2.000 kg leichter ist. Ist die Differenz geringer als 2.000 kg sind auch die möglichen Mehrkosten geringer. So ist z.B. bei einer Gewichtsreduzierung von 500 kg und einer Mehrinvestition von 2.000 € die Wirtschaftlichkeit nach 12,9 Jahren erreicht. Ist das Gerät 2.500 € teurer, wird die Wirtschaftlichkeit nicht innerhalb einer Abschreibungsdauer von 15 Jahren erreicht (Anhang H: Tabelle H.2, Abbildung H.2 und Abbildung H.2).

### 9.1.2. Konstante Investition

Es werden Gewichtseinsparungen von 500 kg und 2.000 kg untersucht. Die Mehrkosten werden gestaffelt von 1.000 € bis 5.000 €. Der anzupassende Wert ist der Strompreis, bei dem sich die Maßnahmen rechnen. Des Weiteren wird festgelegt, dass nach 5, 10 bzw. 15 Jahren die Wirtschaftlichkeit erreicht sein muss. Als Ergebnis ergibt sich die Höhe des Strompreises. Abbildungen 9.3 und 9.4 sowie die Tabellen H.3 und H.4 in Anhang H zeigen die Ergebnisse.

Bei einer Gewichtsersparnis von 500 kg und Mehrkosten von 1.000 € muss der Strompreis mindestens  $4,2 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  betragen. Bei Mehrkosten von 5.000 € muss der Strompreis

## 9. Bewertung

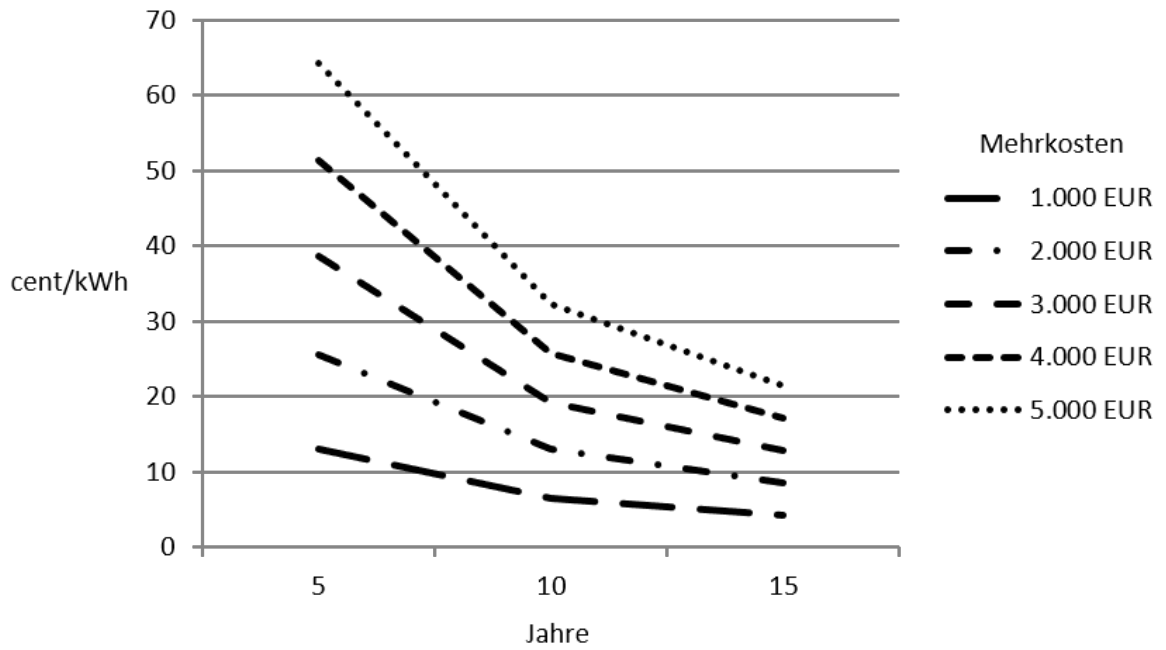


Abbildung 9.3.: Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 500 kg Gewichtserparnis

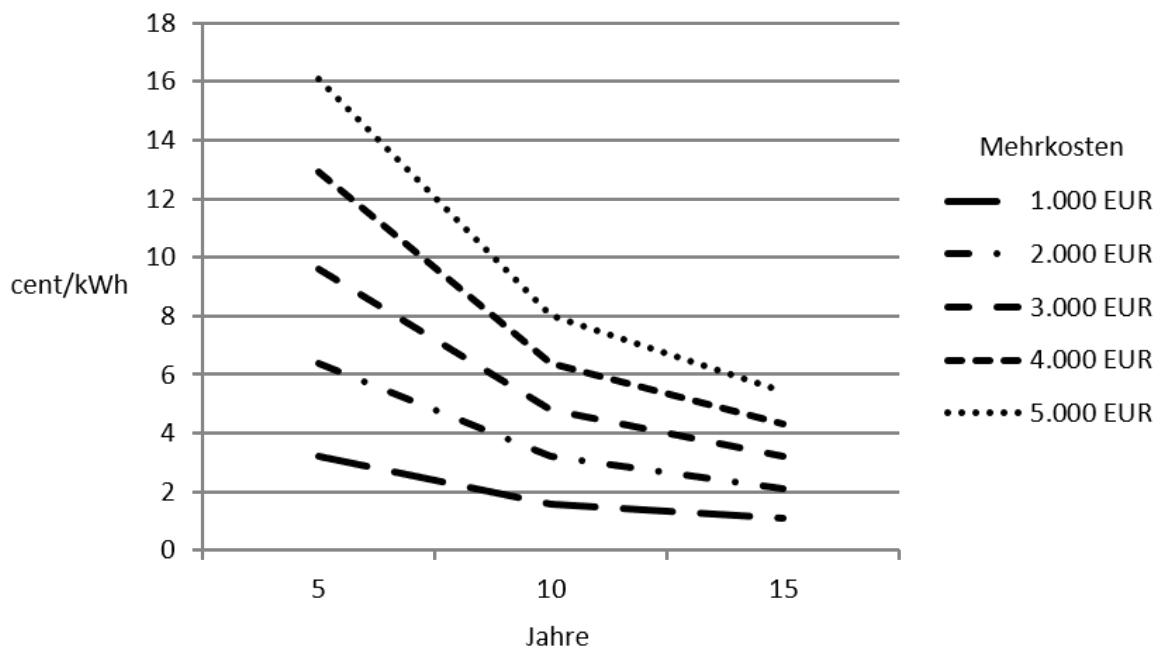


Abbildung 9.4.: Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 2000 kg Gewichtserparnis

21,4  $\frac{ct}{kWh}$  betragen, um in der Zeitdauer von 15 Jahren die Wirtschaftlichkeit zu erreichen (Tabelle H.3). Bei einer Gewichtsersparnis von 2.000 kg und Mehrkosten von 5.000 € muss der Strompreis mindestens 5,4  $\frac{ct}{kWh}$  betragen, um eine Wirtschaftlichkeit nach 15 Jahren aufzeigen zu können (Tabelle H.4).

### Bestimmung eines Kostenfaktors

Ausgehend von den durchgeführten Betrachtungen kann ein Faktor definiert werden, welcher einen Zusammenhang zwischen Stromkosten und Investition herstellt. Hierfür ist eine Vergleichsgröße notwendig. Diese ist das Einzel- oder Doppelspiel. Basierend hierauf können die Stromkosten bzw. die Investition (über die lineare Abschreibung) je Spiel angegeben werden. Somit kann folgende Formel definiert werden:

$$Lf = \frac{K_{S,s}}{K_{A,s}} = \frac{\text{Stromkosten je Spiel in ct}}{\text{Abschreibungskosten je Spiel in ct}} \quad (9.1)$$

$K_{S,s}$  beschreibt die Stromkosten auf ein Spiel bezogen,  $K_{A,s}$  die Investitionen ebenfalls abgebildet pro Spiel. Im Vorfeld muss eine Abschreibedauer sowie die Bezugsgröße (Einzel- oder Doppelspiel) festgelegt werden. Danach kann Faktor  $L_{1,x}$  für das existierende RBG (Vergleichsmodell, Teilbereich 1) bestimmt werden. In einem zweiten Schritt kann dann der Faktor  $L_{2,x}$  für das gewichtsreduzierte RBG bestimmt werden.  $x$  steht hierbei für die Abschreibedauer. Solange  $L_{1,x} > L_{2,x}$  ist, ist bei gegebener Abschreibedauer  $x$  das existierende RBG wirtschaftlicher. Bei  $L_{1,x} = L_{2,x}$  ist der Umkehrpunkt erreicht. Somit ist bei  $L_{1,x} < L_{2,x}$  das gewichtsreduzierte RBG wirtschaftlicher (bei gegebener Abschreibedauer  $x$ ).

## 9.2. Spielzeiteffizienter Betrieb

Hier werden zwei Untersuchungen vorgenommen. Zum einen wird eine konstante Zugriffszeit je Gasse angenommen (Szenario 1). Zum anderen wird ein konstanter Durchsatz des gesamten Lagers angenommen (Szenario 2). Um die genannten Varianten untersuchen zu können, wird vorab das Beispiellager aus Kapitel 9 detaillierter dargestellt und erweitert.

### 9.2.1. Definition des Beispiellagers

Als Ausgangsgröße soll festgelegt werden, dass der Wandparameter einer Regalgasse bei 1 liegen soll. Der Wandparameter wird nach (Arnold and Furmans 2009, Seite 199) wie folgt definiert:

$$A = \frac{H}{L} \cdot \frac{v_x}{v_y} \quad (9.2)$$

Da bisher die Auslegung des Mastes aus faserverstärkten Kunststoffen mit 17 Metern Länge erfolgte, soll auch hier diese Höhe des Mastes angenommen werden. Da aufgrund von oberem und unterem Anfahrmaß die vertikale Verfahrachse des Hubwagens nicht die

## 9. Bewertung

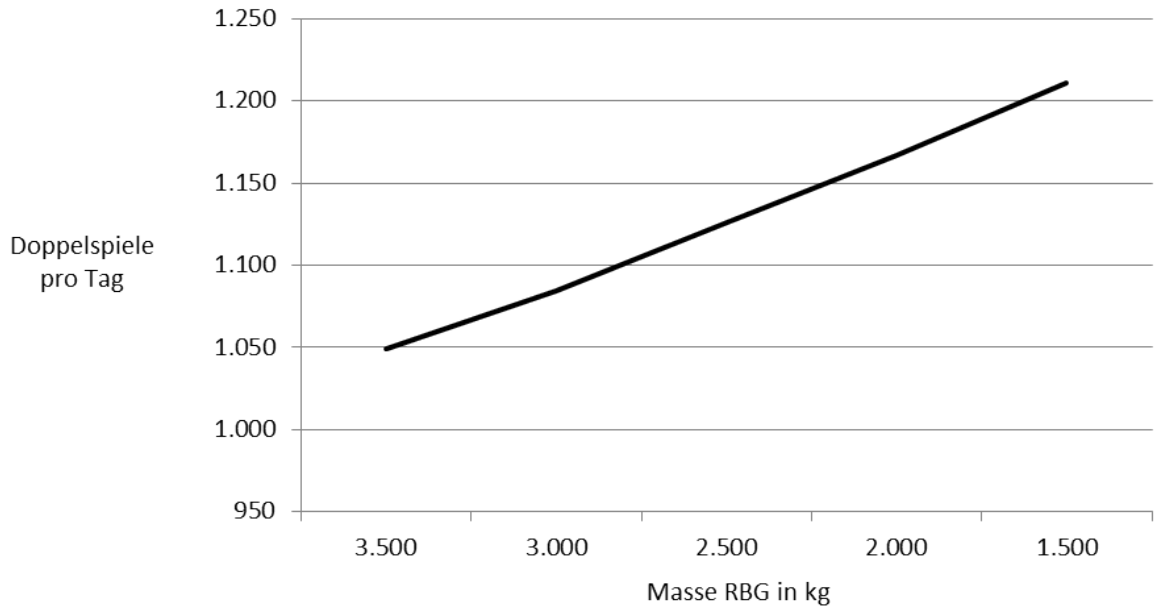


Abbildung 9.5.: Anzahl Doppelspiele je Tag bei konstantem Stromverbrauch

gesamte Länge angefahren werden kann, wird von einer vertikalen Verfahrmöglichkeit von  $H = 16,8\text{ m}$  ausgegangen. Mit Werten für die Geschwindigkeiten von  $v_x = 5\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $v_y = 3\frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergibt sich nach Gleichung 9.2 eine horizontale Verfahrlänge von  $L = 28,0\text{ m}$ . Der Ladungsträger soll ein Standard-KLT mit den Maßen von  $400 \cdot 600\text{ [mm]}$  Grundfläche und einer Höhe von  $280\text{ mm}$  sein. Folglich kann bei einer Längseinlagerung der KLT davon ausgegangen werden, dass die durchschnittliche Fachbreite  $500\text{ mm}$  sowie die durchschnittliche Ebenenhöhe ebenfalls  $500\text{ mm}$  betragen. In diesen Werten sind bereits der Regalstahlbau sowie die Regalsprinklerung mit den notwendigen Toleranzen berücksichtigt. Bei einfachtiefer Lagerung ergeben dies somit 56 KLT in einer Ebene auf einer Seite, folglich 112 KLT in einer Ebene je Gasse. Bei einer Höhe von  $16,8\text{ Metern}$  können 33 Ebenen realisiert werden. Somit haben je Gasse 3696 KLT Platz.

### 9.2.2. Szenario 1: Konstante Zugriffszeit je Gasse

Angenommen wird, dass ein leichteres RBG bei gleichbleibendem Stromverbrauch ein Doppelspiel schneller absolvieren kann.

Tabelle 9.2 zeigt, dass mit geringerem Gewicht und konstantem Stromverbrauch die Beschleunigung deutlich steigt und die Spielzeit des RBG bei dem definierten Lager sinkt. Die Anzahl der Doppelspiele steigt dabei um bis zu 15%.

Wird eine konstante Spielzeit je Gasse angenommen, so kann die Anzahl der Stellplätze je Gasse erhöht werden. Tabelle 9.3 und Abbildung H.4 in Anhang H zeigen diesen Zusammenhang. Hier ist zu erkennen, dass bei gleicher Spielzeit, vergleichbarem Strombedarf und Verringerung der Masse um  $1.500\text{ kg}$  die Anzahl der Lagerplätze um ca. 50% steigt. Folglich könnte bei Einsatz von leichten Regalbediengeräten bis zu jedes dritte

Masse [kg]	Beschleunigung [ $\frac{m}{s^2}$ ]	Doppelspielzeit [s]	Anzahl Doppelspiele pro Tag
3.500	1,50	21,96	1.049
3.000	1,77	21,19	1.087
2.500	2,15	20,45	1.126
2.000	2,73	19,70	1.169
1.500	3,71	18,98	1.213

Tabelle 9.2.: Beschleunigungswerte und Spielzeit bei konstantem Stromverbrauch

Masse [kg]	Beschleunigung [ $\frac{m}{s^2}$ ]	Abmaße des Regals LxH in [m]	Wand- parameter	Anzahl Stellplätze des Regals	Anzahl Stellplätze Gang
3.500	1,50	28x16,5	0,98	1.848	3.696
3.000	1,77	30x18	1	2.160	4.320
2.500	2,15	32x19	0,99	2.432	4.864
2.000	2,73	34x20	0,98	2.720	5.440
1.500	3,71	36,5x21,5	0,98	3.139	6.278

Tabelle 9.3.: Vergrößerung des Regals (in Anzahl Stellplätze angegeben) bei gleicher Spielzeit (21,96 s) und gleichem Stromverbrauch

RBG eingespart werden. Werden hier Kosten von 150.000 EUR je RBG angenommen und dies auf die anderen beiden RBG verteilt, so könnte ein RBG um 75.000 EUR teurer werden bei gleicher Anzahl Lagerplätze. Hier ist jedoch nicht berücksichtigt, dass bei einem Drittel weniger Gassen der parallele Zugriff auf verschiedene Lagerplätze deutlich reduziert ist. Kapitel 9.2.3 trägt diesem Sachverhalt Rechnung.

### 9.2.3. Szenario 2: Konstanter Durchsatz des Lagers

Bei den gegebenen Abmessungen des Regals können 3696 Plätze je Gasse realisiert werden. Wird angenommen, dass ein automatisches Kleinteilelager elf Gassen umfasst, bedeutet dies ein Lagervolumen von 40.656 Lagerplätzen. Es ist zu klären, wie viel leichter ein RBG sein muss, um eine Gasse einzusparen. Hierzu werden in einem ersten Schritt neue Gassenabmessungen bestimmt.

40.656 Lagerplätze auf 10 Gassen verteilt bedeutet 4.066 Lagerplätze je Gasse. Folglich kommen 370 Plätze je Gasse hinzu. Um die Abmessungen für das neue Lager zu bestimmen, genügt es, eine Regalwand einer Gasse zu betrachten. Je Regalwand wird eine Lagerkapazität von 2.033 Lagerplätzen benötigt. Bei dem gegebenen Standard-KLT ergibt dies die in Tabelle 9.4 dargestellten Werte (Länge und Höhe der Gassen).

In einem zweiten Schritt wird der Durchsatz des Lagers betrachtet. Zehn Gassen ermöglichen den gleichen Durchsatz wie elf Gassen. Es wird die zu Beginn vorgestellte

## 9. Bewertung

	aktuelles Regal	neues Regal 1	neues Regal 2
Anzahl Gassen	11	10	10
Länge [m]	28	29	29,5
Höhe [m]	16,5	17,5	17,5
$P_1(\frac{1}{5}L; \frac{2}{3}H)$	5,6 ; 11	5,8 ; 11,67	5,9 ; 11,67
$P_2(\frac{2}{3}L; \frac{1}{5}H)$	18,67 ; 3,3	19,33 ; 3,5	19, 67 ; 3,5
Wandparameter	0,98	1,01	0,99
Gesamtkapazität	40.656	40.600	41.300
Kapazität pro Gasse	3.696	4.060	4.130
Kapazität pro Regalwand	1.848	2.030	2.065
Benötigte Doppelspielzeit [s]	21,95 s	19,18 s	19,18 s
Benötigte Beschleunigung $a_x [\frac{m}{s^2}]$	1,81	3,99	4,4
Benötigte Gewichtsersparnis [kg]	–	2.000	2.150

Tabelle 9.4.: Regalabmessungen

Betriebszeit von täglich acht Stunden bei 80 % Auslastung angenommen. Dies ergibt eine Anzahl Doppelspiele je Tag von 1091 bei elf Gassen. Daraus folgt eine Spielzeit von 21,1 Sekunden je Doppelspiel. Um diesen Durchsatz bei zehn Gassen zu erreichen, werden 1201 Doppelspiele je Tag bei gleicher Auslastung benötigt. Dies hat eine notwendige Spielzeit von 19,17 Sekunden zur Folge.

Nun muss mit der Spielzeitformel für das Doppelspiel entsprechend die nötige Beschleunigung bestimmt werden. Nach (Arnold and Furmans 2009) ist der Erwartungswert der mittleren Doppelspielzeit:

$$E(t_s) = t_0 + 4 \cdot t_z + 3 \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} + \frac{14}{30} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (9.3)$$

Hieraus kann folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$E(t_s) = t_0 + 4 \cdot t_z + \frac{3}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{26}{15} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (9.4)$$

Nun kann Gleichung 9.4 nach der gesuchten Größe  $a_x$  umgestellt werden und es ergibt sich

$$a_x = \frac{v_x}{\frac{2}{3} \cdot E(t_s) - \frac{2}{3} \cdot t_0 - \frac{8}{3} \cdot t_z - \frac{v_y}{a_y} - \frac{52}{45} \cdot \frac{L}{v_x}} \quad (9.5)$$

Die in Tabelle 9.5 angegebene Werte können als konstant angenommen werden.

Mit Gleichung 9.5, den Werten der Tabelle 9.5 und der jeweiligen mittleren Spielzeit aus Tabelle 9.4 kann nun die benötigte Beschleunigung bestimmt werden. Diese ist in Tabelle 9.4 angegeben.

Bei Annahme des gleichen Energieverbrauchs kann nun mit den angegebenen Beschleunigungswerten die benötigte Gewichtsersparnis bestimmt werden. Analog der Berechnung in Kapitel 9.2.2 ergeben sich die in Tabelle 9.4 angegebenen benötigten Ge-



Größe	Wert
Geschwindigkeit in x-Richtung $v_x \left[\frac{m}{s}\right]$	5
Geschwindigkeit in y-Richtung $v_y \left[\frac{m}{s}\right]$	3
Beschleunigung in y-Richtung $a_y \left[\frac{m}{s^2}\right]$	1,5
Totzeit $t_0 [s]$	0,25
Beschleunigungszeit in y-Richtung $t_y [s]$	1

Tabelle 9.5.: Konstante Werte eines Kleinteile-AKL

wichtersparnisse von 2.000 *kg* für Regal 1 und 2.150 *kg* für Regal 2. Nimmt man wiederum den Investitionswert eines RBG von 150.000 EUR, so ergibt sich eine mögliche Kostensteigerung je RBG von 15.000 EUR für die angegebene Gewichtsersparnis.



# 10. Zusammenfassung

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurden die Fragen aufgeworfen, ob ein RBG mit Faser-Kunststoff-Verbunde realisiert und ob dieses RBG wirtschaftlich betrieben werden kann (Kapitel 1). Dazu wurde nach einer Einführung der Regalbediengeräte (Kapitel 3) sowie Grundlagen der Werkstoffe (Kapitel 4) in der Zielformulierung festgelegt, welches Regalbediengerät detailliert betrachtet werden soll. Hierfür ist ein Kleinteile-RBG ausgewählt worden. Dieses Kleinteile-RBG wurde anschließend analysiert und die Baugruppe mit dem größten Gewichtseinsparpotential identifiziert. Hieraus ist der Mast des RBG als erfolgversprechendstes Bauteil ausgewählt worden (Kapitel 5). Die anschließende Werkstoffauswahl für den Mast des RBG ergab als geeigneten Werkstoff eine Kohlenstofffaser verstärkte Epoxidharzmatrix, hergestellt im Pultrusionsverfahren (Kapitel 6). Unter Berücksichtigung der Randbedingungen wurde mit diesem Material eine Mastkonstruktion entwickelt (Kapitel 7) und eine Gewichtsersparnis von 32,16 % gegenüber dem Vergleichsmast aus Stahl erzielt. Jedoch sind dabei die reinen Materialkosten des Mastes um das 20-fache gestiegen (Kapitel 7.4). Um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen der Gewichtsreduzierung treffen zu können, wurde in Kapitel 8 ein Modell zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erarbeitet. Kapitel 9 bewertet mittels dieses Modells verschiedene Szenarien. Für die Bewertung ist die Unterteilung zwischen energieeffizientem Betrieb (Kapitel 9.1) und spielzeiteffizientem Betrieb (Kapitel 9.2) vorgenommen worden.

Für den energieeffizienten Betrieb erfolgten zwei Untersuchungen. Zum einen wurde ein konstanter Strompreis angenommen, zum anderen die Investitionskosten konstant gehalten.

Der konstante Strompreis ist bei  $10 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  festgesetzt worden. Dabei wurde festgestellt, dass Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung von 500 kg nicht mehr als 2.000 EUR Mehrkosten bei der Investition zur Folge haben dürfen. Andernfalls wäre eine Amortisation innerhalb von 15 Jahren nicht gegeben. Da heutige Kleinteile-RBG bereits gewichtsoptimiert konstruiert sind, kann eine solche Gewichtsreduktion nur durch Werkstoffleichtbau erreicht werden. Kapitel 7 hat jedoch gezeigt, dass der Einsatz neuer Materialien derzeit wesentlich höhere Mehrkosten zur Folge hat. Somit ist der Einsatz von FVK unter Berücksichtigung eines konstanten Strompreises von  $10 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  nicht wirtschaftlich.

Bei der Bewertung unter Berücksichtigung von konstanten Investitionskosten wurden Berechnungen mit 1.000 EUR, 2.000 EUR, 3.000 EUR, 4.000 EUR und 5.000 EUR Mehrkosten bei der Investition untersucht. Es wurden zwei Berechnungsdurchläufe vorgenommen, jeweils mit 500 kg und 2.000 kg. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass bei 500 kg Gewichtsreduzierung und 1.000 EUR Mehrkosten der Strompreis  $4,2 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  betragen muss, um innerhalb von 15 Jahren die Amortisation zu erreichen. Bei 5.000 EUR

## 10. Zusammenfassung

Mehrkosten muss der Strompreis  $21,4 \frac{ct}{kWh}$  betragen. Sowohl 1.000 EUR Mehrkosten (vgl. Kapitel 7) als auch ein Strompreis von  $21,4 \frac{ct}{kWh}$  können jedoch als zurzeit nicht realistisch angesehen werden. Eine Gewichtsersparnis von 2.000 kg bei Kleinteile-RBG mit Mehrkosten von 5.000 EUR hat einen Strompreis von  $5,4 \frac{ct}{kWh}$  für die Amortisation nach 15 Jahren zur Folge. Jedoch ist eine solche Gewichtsreduzierung bei 5.000 EUR Mehrkosten zurzeit unrealistisch. Somit ist der Einsatz von FKV bei konstanten Investitionskosten ebenfalls nicht wirtschaftlich.

Hinsichtlich eines spielzeiteffizienten Betriebs wurde untersucht, inwieweit eine Gewichtsreduzierung bei gleichbleibendem Energieverbrauch die Spielzeit reduziert werden kann.

Mittels eines Beispiellagers ist analysiert worden, ab welcher Spielzeitreduzierung, gleichem Gesamtdurchsatz und gleichem Energieverbrauch eine Gasse und somit ein RBG eingespart werden kann. Wird eine Gewichtsreduzierung von 1.500 kg realisiert, so kann die Anzahl der Lagerplätze um 50 % je Gasse erhöht werden. Somit könnte jede dritte Gasse eingespart werden. Bei Kosten je RBG von 150.000 EUR können die Gewichtsreduzierungsmaßnahmen 75.000 EUR je RBG Mehrkosten erzeugen. Hier ist jedoch nicht berücksichtigt, dass bei einem Drittel weniger Gassen der parallele Zugriff auf verschiedene Lagerplätze deutlich reduziert ist. Diesen Sachverhalt berücksichtigt Kapitel 9.2.3. Hier beträgt die Reduzierung der Anzahl der Gassen nicht ein Drittel, sondern ein Elftel.

Je Gasse muss die Spielzeit erhöht werden, um den Gesamtdurchsatz im Lager gleich halten zu können. Hier ist zu erkennen, dass um bei elf Gassen eine Gasse einsparen zu können, ein RBG 2.000 kg leichter sein muss und hierfür max. 15.000 EUR Mehrkosten entstehen dürfen.

Vergleicht man nun den realistischen Fall des Szenario zwei (Kapitel 9.2.3) mit dem Ergebnis aus Kapitel 7, wird ersichtlich, dass allein schon die um 14.212,35 EUR höheren Materialkosten diesen Vorteil fast aufbrauchen. Dabei konnte das Gewicht des RBG lediglich um 857,06 kg reduziert werden, und nicht um 2.000 kg.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz leichterer (und in der Regel kostenintensiver) Materialien nicht durch einen höheren Strompreis kompensiert werden kann. Der Ansatz des Wirtschaftlichkeitsnachweises kann nur über neue Lagerkonfigurationen erfolgen. Dabei ist es das Ziel, die Anzahl der RBG bei gleichen Gesamtdurchsatz zu verringern. Nur dann kann eine Wirtschaftlichkeit gegeben sein.

# Literatur

- Arnold, D. (2008). *Handbuch Logistik* (3 ed.). Berlin: Springer.
- Arnold, D. and K. Furmans (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen* (6 ed.). Berlin and Heidelberg: Springer.
- Ashby, M. F. (2005). *Materials selection in mechanical design* (3 ed.). Amsterdam and Boston: Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4 ed.). Amsterdam and Boston and Burlington and Mass: Elsevier and Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F. (2012). *Softwarepaket Granta CES 2013*. Cambridge: Granta Design Limited.
- Ashby, M. F. and D. R. H. Jones (2007). *Werkstoffe* (3 ed.). München: Elsevier, Spektrum Akad. Verl.
- Bargel, H.-J., H. Hilbrans, and G. Schulze (2008). *Werkstoffkunde* (10 ed.). Berlin [u.a.]: Springer.
- Bergmann, H. W. (1992). *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*. Berlin: Springer-Verlag.
- Braun, M., P. Linsel, F. Schönung, and K. Furmans (2012). *Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang*. Beitrag in: Logistics Journal 2012.
- Bräuning, R. (2010). *Faserverbundwerkstoffe, Leichtbau zur Energieeinsparung in der Fördertechnik: VDI-IFL Sommerseminar 2012*. Karlsruhe: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012). *Einigung über EU-Energieeffizienz-Richtlinie zum Energierat am 15. Juni 2012*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- Daenzer, W. F. and R. Haberfellner (2002). *Systems engineering: Methodik und Praxis* (11 ed.). Zürich: Verl. Industrielle Organisation.
- Dieter, G. E. (1997). Overview of the materials selection process. In G. E. Dieter (Ed.), *ASM handbook*, Volume 20, pp. 243–254. [Metals Park and Ohio]: ASM International.
- DIN 15350 (1992). *Regalbediengeräte: Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN 528 (2009). *Regalbediengeräte - Sicherheitsanforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.

## LITERATUR

- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften* (2 ed.). München [u.a.]: Hanser.
- Ehrlenspiel, K. and A. Kiewert (1990). *Ingenieurwerkstoffe im technischen Fortschritt: Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Europäische Kommission (2011). *Vorschlag für RICHTLINIE DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Energieeffizienz und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG*. Brüssel: Europäische Kommission.
- Farag, M. M. (2008). *Materials and process selection for engineering design* (2 ed.). Boca Raton and FL: CRC Press.
- FEM 9.101 (1997). *Terminologie - Regalbediengeräte - Definitionen*. Frankfurt: Deutsches Nationalkomitee der FEM.
- FEM 9.754 (1988). *Sicherheitsregeln für automatische Klein-Regalbediengeräte*. Frankfurt: Deutsches Nationalkomitee der FEM.
- FEM 9.831 (1995). *Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Toleranzen, Verformungen und Freimaße im Hochregallager*. Frankfurt: Deutsches Nationalkomitee der FEM.
- FEM 9.851 (2003). *Leistungsnachweise für Regalbediengeräte - Spielzeiten*. Frankfurt: Deutsches Nationalkomitee der FEM.
- Fischer, J. and F. Pfeffel (2010). *Systematische Problemlösung in Unternehmen: Ein Ansatz zur strukturierten Analyse und Lösungsentwicklung* (1 ed.). Lehrbuch. Wiesbaden: Gabler.
- Furmans, K. and P. Linsel (2011). Leichtbau bei unstetigförderern durch einsetz moderner werkstoffe. In N. Vojdani (Ed.), *7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*, pp. 14–25. Dortmund: Praxiswissen Service.
- GEBHARDT Fördertechnik GmbH (2012). Gebhardt fördertechnik gmbh - cheetah akl regalbediengerät.
- Grosch, J. (1986). *Werkstoffauswahl im Maschinenbau*. Kontakt + Studium. Sindelfingen: expert-Verl.
- Gross, D. (2012). *Technische Mechanik* (11 ed.). Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer.
- Gudehus, T. (2011). *Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. SpringerLink : Bücher. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Günther, H.-O. and H. Tempelmeier (2012). *Produktion und Logistik* (9 ed.). Berlin and Heidelberg: Springer.
- JACOBY, M. (2004). Composite materials. *Chemical & Engineering News* 82(35), 34–41.
- Klein, B. (2009). *Leichtbau-Konstruktion* (8 ed.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

- Koether, R. (2007). *Technische Logistik* (3 ed.). München: Hanser.
- Kunz, J. and M. Studer (2006). Bauteilauslegung: Druck-elastizitätsmodul über shore-a-härte ermitteln. *Kunststoffe 06 2006*, 92–94.
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Material Selection*. New York: John Wiley & Sons, inc.
- Lippolt, C. (2003). *Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung*. Ph. D. thesis.
- Möhler, P. (1995). *Lokale Kraftgrößen in der Berührungsfläche zwischen Kunststoffrad und Stahlfahrbahn*, Volume 1995.
- Olfert, K. (2003). *Kostenrechnung* (13 ed.). Ludwigshafen (Rhein): Kiehl.
- Reuter, M. (2007). *Methodik der Werkstoffauswahl*. München: Carl Hanser.
- Schumacher, M. (2010). Energiesparen mit system, effiziente antriebstechnik der intralogistik. In K. Furmans (Ed.), *Wege zu einer verantwortlichen Ressourcenverwendung in der Logistik. VDI - IFL Sommerseminar 2010. Seminarreihe vom 8. Juni bis 13. Juli 2010. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie*. Universität Karlsruhe.
- Schürmann, H. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen* (2 ed.). Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- VDI 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- VDI 3561 (1973). *Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderfahrzeugen*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- VDMA (2010). *Zahlenkompass 2010*.
- Weissbach, W. (2012). *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung* (18 ed.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Weyerstrass, K., J. Jaenicke, and K. Schönplüg (2008). *Künftige entwicklungen der energiepreise*.
- Wittel, H., D. Muhs, D. Jannasch, and J. Voßiek (2013). *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Vieweg + Teubner Verlag.





# A. Darstellung der Herstellverfahren

	relative Bearbeitungskosten	relative Anlagenkosten	Energiekosten	Summe
Auftragende Methode	1	1	3	<b>5</b>
BMC	2	2	2	<b>6</b>
Faserwickelverfahren	1	3	2	<b>6</b>
RTM	3	2	3	<b>8</b>
Pultrusion	2	3	1	<b>6</b>
Vacuum RTM	1	2	2	<b>5</b>

Tabelle A.1.: Relativer Kostenindex der Herstellungsverfahren  
1 = niedrig, 2 = mittel, 3 = hoch (Ashby 2012)

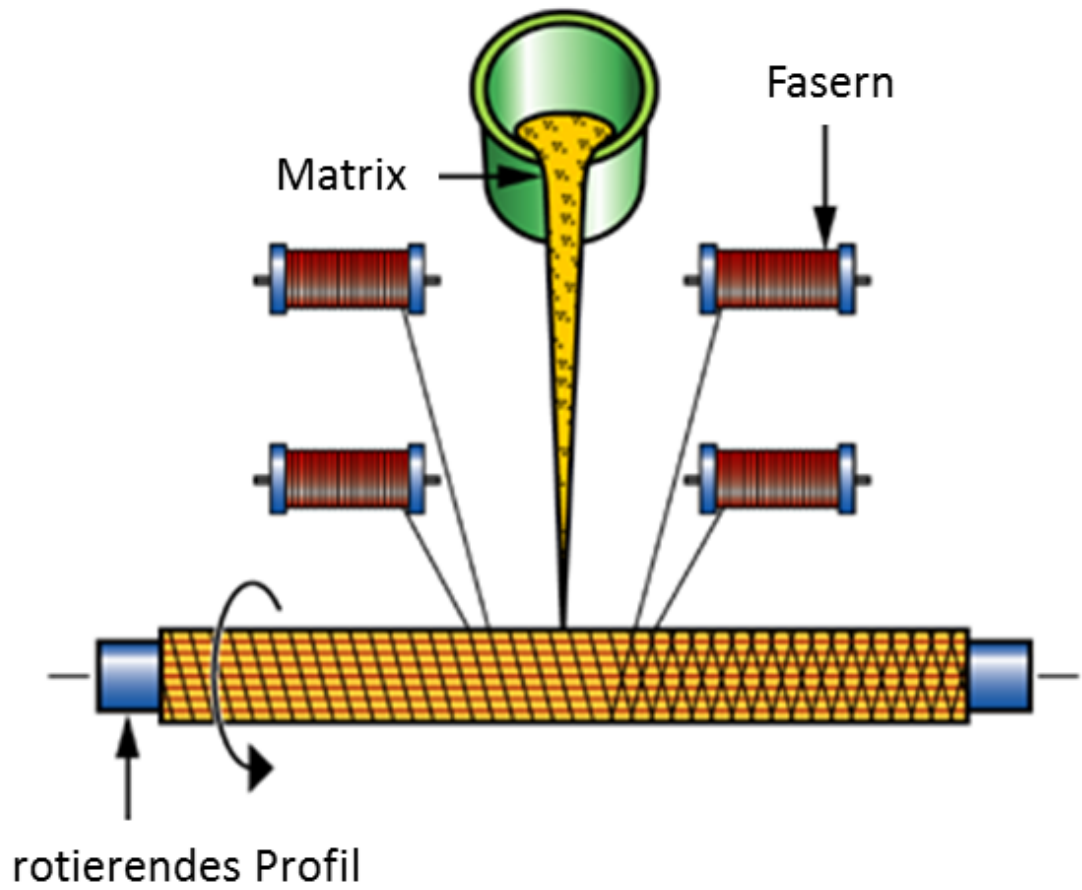


Abbildung A.1.: Wickelverfahren  
(Ashby 2012)

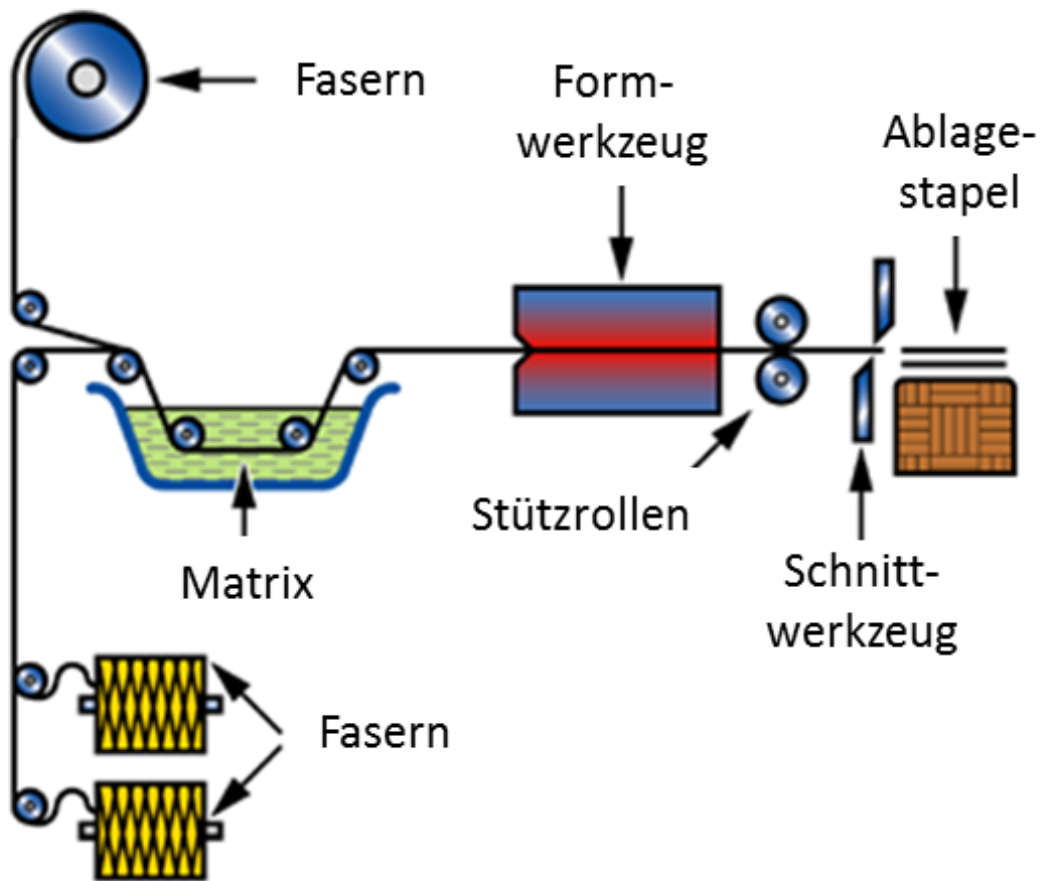


Abbildung A.2.: Pultrusionsverfahren  
(Ashby 2012)

A. Darstellung der Herstellverfahren

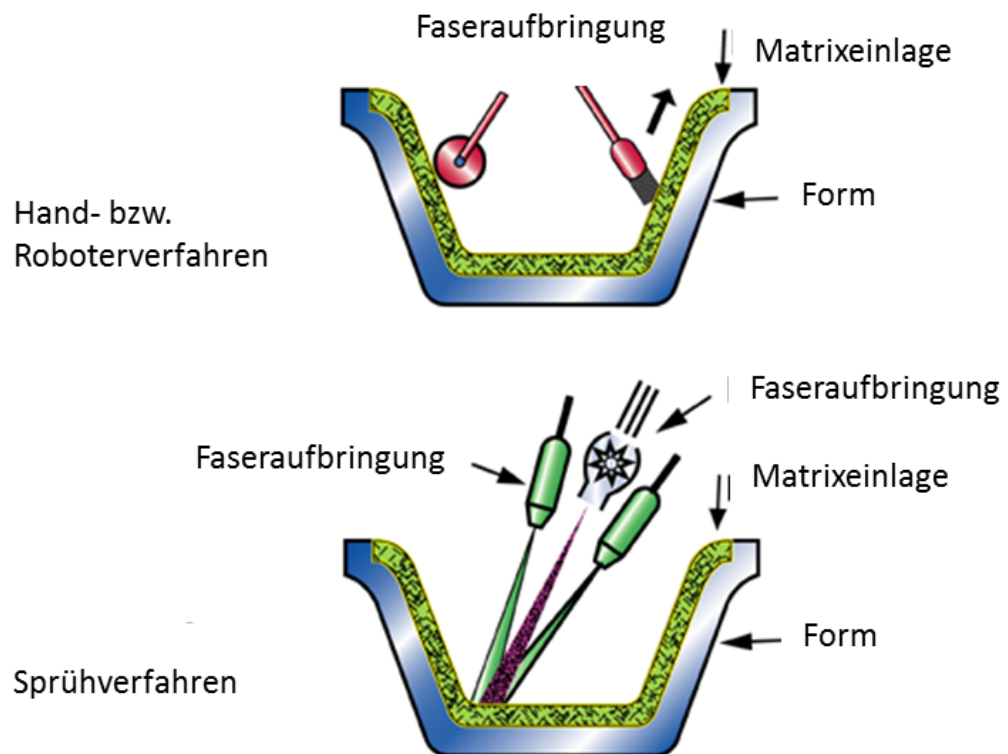


Abbildung A.3.: Auftragende Methode (Ashby 2012)

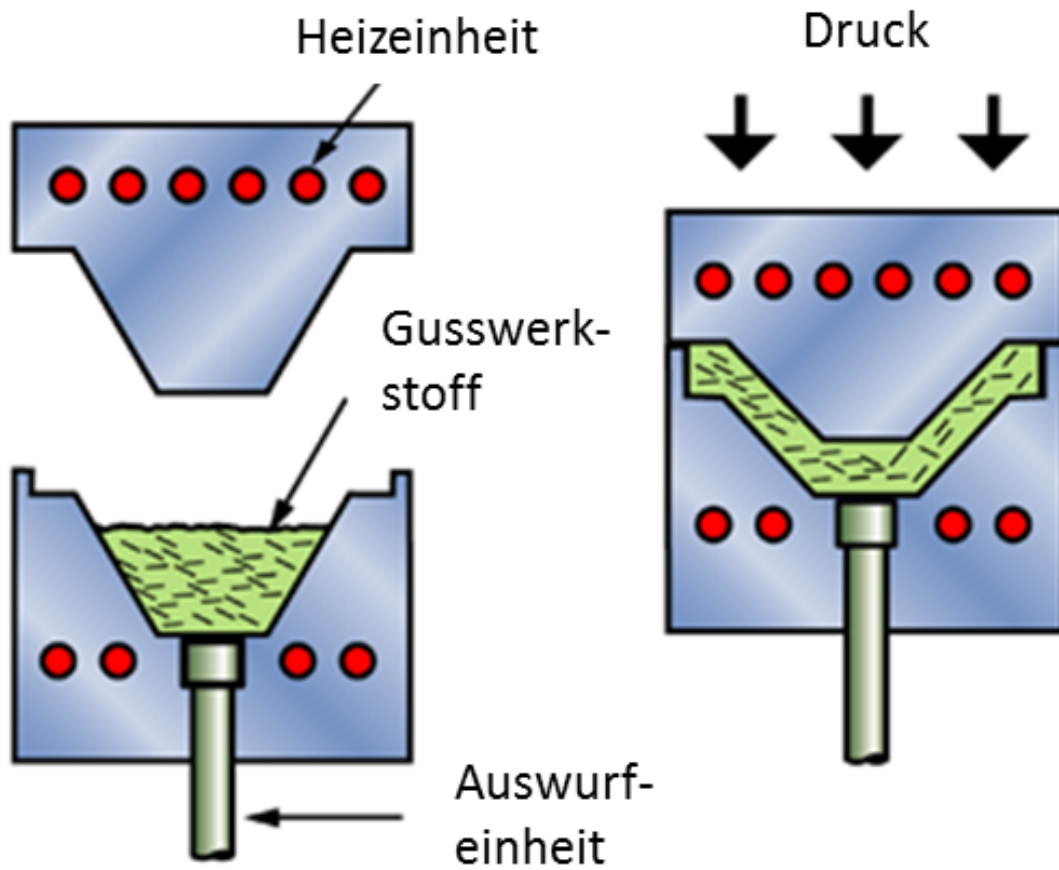


Abbildung A.4.: BMC  
(Ashby 2012)

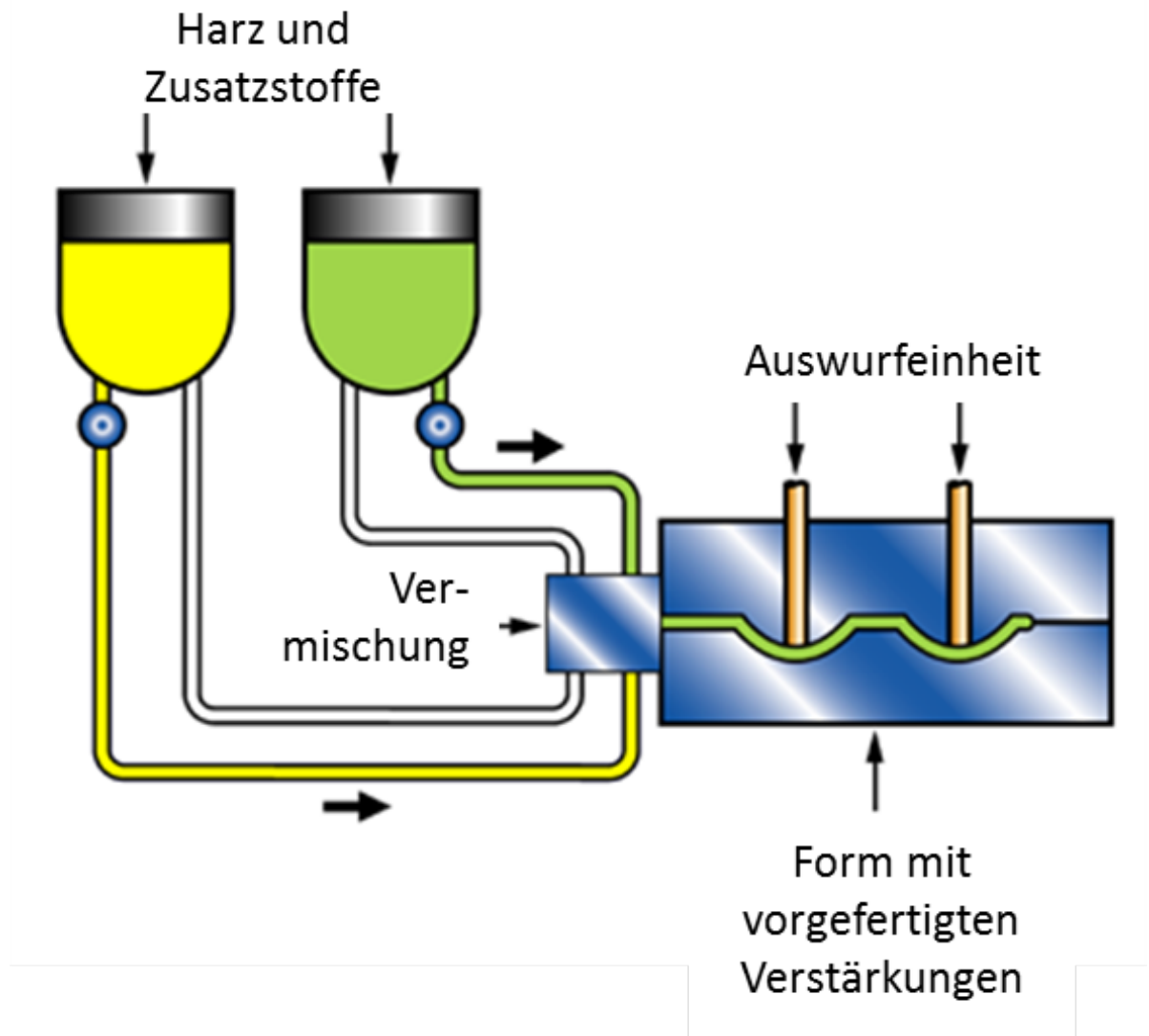


Abbildung A.5.: RTM  
(Ashby 2012)

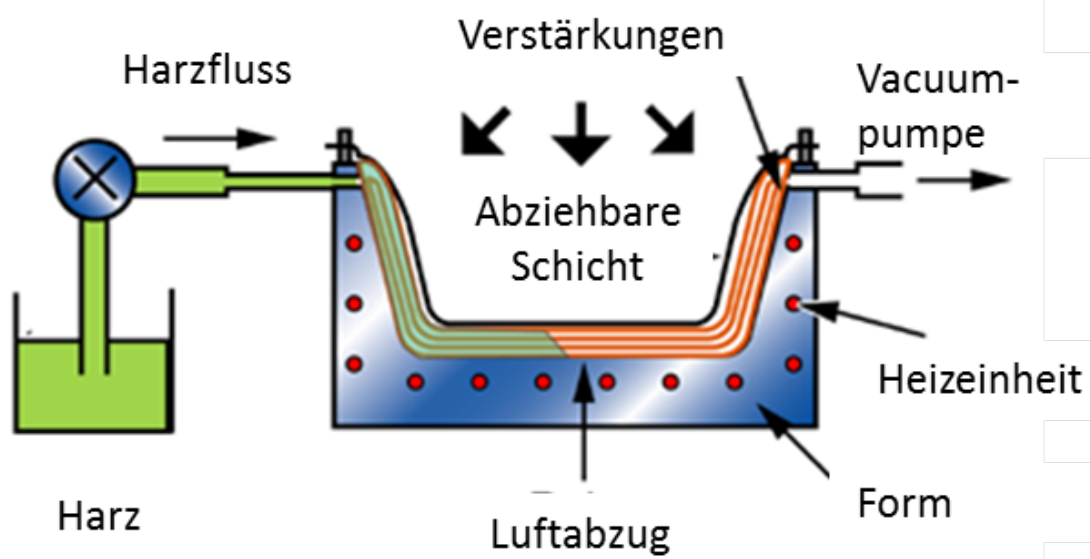


Abbildung A.6.: Vakuum-RTM  
(Ashby 2012)





## B. Bestimmung der Maststeifigkeit

Nach (Gross 2012) wird die Verschiebung  $w$  eines rechteckigen Hohlprofils mit nachfolgender Gleichung bestimmt:

$$w = \frac{M \cdot l^2}{2 \cdot E \cdot I} \quad (\text{B.1})$$

Mit den Werten nach Tabelle 5.6 und einem E-Modul für Stahl von  $E = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ergibt für die einzelnen Abschnitte folgende Verschiebung:

$$w_a = 0,0509 \text{ m} \quad (\text{B.2})$$

$$w_b = 0,0513 \text{ m} \quad (\text{B.3})$$

$$w_c = 0,1010 \text{ m} \quad (\text{B.4})$$

werden nun die Verschiebungen der einzelnen Abschnitte aufaddiert erhält man eine Gesamtverschiebung der Mastspitze von

$$w_g = 0,2032 \text{ m} \quad (\text{B.5})$$



# C. Auflistung der FVK

## C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften

- BMI/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 76,10 - 91,50  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.570 - 1.610  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 43.700 - 50.700  
Faseranteil [%]: 60 - 70
- BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 114,00 - 137,00  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.510 - 1.570  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 67.000  
Faseranteil [%]: 60 - 70
- BMI/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 114,00 - 137,00  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.510 - 1.570  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 48.200 - 48.300  
Faseranteil [%]: 60 - 70
- Cyanate ester/HM carbon fiber, DU composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 167,00 - 187,00  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.620 - 1.670  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 101.000 - 115.000  
Faseranteil [%]: 60 - 70
- Epoxy SMC (carbon fiber)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 18,60 - 20,50  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.400 - 1.700

### C. Auflistung der FVK

- E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 69.000 - 150.000  
Faseranteil [%]: 15 - 50
- Epoxy SMC (glass fiber)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 4,10 - 5,18  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.500 - 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 13.800 - 27.600  
Faseranteil [%]: 15 - 50
  - Epoxy/aramid fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 38,10 - 62,60  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1,380  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 23.500 - 30.900  
Faseranteil [%]: 45 - 50
  - Epoxy/E-glass fiber, woven fabric composite, biaxial lamina  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 26,90 - 29,60  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.750 - 1.970  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 26.400  
Faseranteil [%]: 60 - 70
  - Epoxy/E-glass fiber, woven fabric composite, QI laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 26,90 - 29,60  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.750 - 1.970  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 21.000 - 21.800  
Faseranteil [%]: 60 - 70
  - Epoxy/HS carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 29,80 - 33,10  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.550 - 1.580  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 49.700 - 60.100  
Faseranteil [%]: 65 - 70
  - Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial lamina  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 42,10 - 46,70  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.540 - 1.610  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 62.700 - 68.700  
Faseranteil [%]: 60 - 65

### C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften

- Epoxy/HS carbon fiber, woven fabric composite, QI laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 42,10 - 46,70  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.540 - 1.610  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 44.200 - 48.200  
Faseranteil [%]: 60 - 65
- Epoxy/S-glass fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 15,60 - 24,70  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.840 - 1.970  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 23.900 - 24.200  
Faseranteil [%]: 65 - 70
- Glass/epoxy unidirectional composite  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 19,40 - 27,40  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.600 - 1.950  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 35.000 - 45.000  
Faseranteil [%]: 40 - 60
- PA12/E-glass fiber, 290gsm woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 6,74 - 7,30  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 19.100 - 20.000  
Faseranteil [%]: 66
- PA6/E-glass fiber, 600gsm twill fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 5,16 - 5,58  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 21.500 - 22.400  
Faseranteil [%]: 67
- PA66/E-glass fiber, 290gsm woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 5,15 - 5,57  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 20.900 - 21.800  
Faseranteil [%]: 66

### C. Auflistung der FVK

- PA66/E-glass fiber, 600gsm woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 5,13 - 5,55  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 22.100 - 24.400  
Faseranteil [%]: 67
- PEEK/IM carbon fiber, UD composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 90,10 - 99,20  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.550 - 1.570  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 56.100 - 57.100  
Faseranteil [%]: 65 - 70
- Phenolic/E-glass fiber, woven fabric composite, biaxial lamina  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 20,80 - 22,90  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 2.000  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 27.200 - 39.400  
Faseranteil [%]: 30 - 60
- Phenolic/E-glass fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic lamina  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 20,80 - 22,90  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 2.000  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 20.400 - 30.600  
Faseranteil [%]: 30 - 60
- Polyester (glass fiber, preformed, chopped glass)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,52 - 4,84  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 2.100  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 9.700 - 17.200  
Faseranteil [%]: 30 - 60
- Polyester (glass fiber, preformed, chopped roving)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,52 - 4,84  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 2.100  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 6.300 - 13.800  
Faseranteil [%]: 30 - 50

### C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften

- Polyester BMC (10-20% glass fibre)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,29 - 3,86  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 2.500  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 9.000 - 14.400  
Faseranteil [%]: 10 - 20
- Polyester BMC (20-30% glass fibre)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,38 - 4,25  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.740 - 1.990  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 10.500 - 12.100  
Faseranteil [%]: 20 - 30
- Polyester BMC (7-10% glass fibre)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,09 - 3,23  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.760 - 1.950  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 5.500 - 11.700  
Faseranteil [%]: 7 - 10
- Polyester SMC (15% glass fiber, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,31 - 2,82  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 7.900 - 9.200  
Faseranteil [%]: 14 - 16
- Polyester SMC (20% glass fiber, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,47 - 3,15  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 8.400 - 9.800  
Faseranteil [%]: 19 - 22
- Polyester SMC (20% glass fiber, slow-burning)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,48 - 3,18  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.780 - 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 7.300 - 8.800  
Faseranteil [%]: 20 - 22

### C. Auflistung der FVK

- Polyester SMC (25% glass fiber, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,60 - 3,43  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.600 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 8.200 - 9.900  
Faseranteil [%]: 24 - 26
- Polyester SMC (25% glass fiber, slow-burning)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,60 - 3,43  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.400 - 1.800  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 8.000 - 9.000  
Faseranteil [%]: 25
- Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,75 - 3,73  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.650 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 9.500 - 11.600  
Faseranteil [%]: 29 - 31
- Polyester SMC (30% glass fiber, self-extinguishing, low resistivity)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,75 - 3,73  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.730 - 2.090  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 10.500 - 12.700  
Faseranteil [%]: 30
- Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,97 - 3,96  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.580 - 2.000  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 10.500 - 11.500  
Faseranteil [%]: 30
- Polyester SMC (30% glass fibre, slow-burning, low density)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,97 - 3,96  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.270 - 1.540  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 6.360 - 7.700  
Faseranteil [%]: 30



### C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften

- Polyester SMC (35% glass fibre, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 2,90 - 4,04  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.700 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 10.000 - 11.700  
Faseranteil [%]: 34 - 36
- Polyester SMC (40% glass fibre, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,05 - 4,34  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.750 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 10.700 - 12.500  
Faseranteil [%]: 39 - 40
- Polyester SMC (50% glass fiber, self-extinguishing)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,34 - 4,94  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.730 - 2.090  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 11.800 - 14.300  
Faseranteil [%]: 50
- Polyester SMC (50% glass fiber, slow-burning)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,34 - 4,94  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.730 - 2.090  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 11.800 - 14.300  
Faseranteil [%]: 50
- Polyester/45wt% E-glass fiber, woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,69 - 1,87  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.500 - 1.600  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 13.000 - 19.000  
Faseranteil [%]: 40 - 50
- Polyester/65wt% E-glass fiber, woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,69 - 1,87  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.800 - 1.900  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 17.000 - 25.000  
Faseranteil [%]: 60 - 70

### C. Auflistung der FVK

- Polyester/E-glass fiber, filament wound composite,  $\pm 60^\circ$  laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,46 - 1,61  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 2.020 - 2.220  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 15.000 - 16.500  
Faseranteil [%]: 75
- Polyester/E-glass fiber, non-crimp fabric composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,66 - 1,83  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.650 - 1.780  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 15.200 - 21.100  
Faseranteil [%]: 50 - 60
- Polyester/E-glass fiber, pultruded composite rod, unidirectional laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,40 - 1,54  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.900 - 2.100  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 35.000 - 45.000  
Faseranteil [%]: 65 - 75
- Polyester/E-glass fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 1,71 - 1,89  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.710 - 1.890  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 16.500 - 18.100  
Faseranteil [%]: 46 - 50
- Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, biaxial laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 115,00 - 127,00  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.590 - 1.630  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 58.100 - 62.300  
Faseranteil [%]: 65 - 70
- Polyimide/HS carbon fiber, woven fabric composite, quasi-isotropic laminate  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 115,00 - 127,00  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.590 - 1.630  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 42.200 - 45.700  
Faseranteil [%]: 65 - 70

### C.1. Alphabetische Aufstellung der FVK mit technischen Eigenschaften

- PP (30% random glass mat, homopolymer)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,27 - 3,60  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.090 - 1.110  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 4.510 - 4.740  
Faseranteil [%]: 30
- PP (40% random glass mat, homopolymer)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,42 - 3,77  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.180 - 1.200  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 5.720 - 6.010  
Faseranteil [%]: 40
- PP (42% directionalized glass mat - parallel, homopolymer)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,45 - 3,80  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.200 - 1.220  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 9.420 - 9.890  
Faseranteil [%]: 42
- PP (42% directionalized glass mat - transverse, homopolymer)  
Preis [ $\frac{EUR}{kg}$ ]: 3,45 - 3,80  
Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]: 1.200 - 1.220  
E-Modul [ $\frac{N}{mm^2}$ ]: 4.740 - 4.980  
Faseranteil [%]: 42



**D. Details des Werkstoffes  
Kohlenstofffaser verstärktes  
Epoxidharz**

D. Details des Werkstoffes Kohlenstofffaser verstärktes Epoxidharz

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Mischungsverhältnis		
Harzanteil	50 – 85	%
Faseranteil	15 – 50	%
Mechanische Werte		
Dichte	$1,4 \cdot 10^3 - 1,7 \cdot 10^3$	$\frac{kg}{m^3}$
Preis	18,60 – 20,50	$\frac{EUR}{kg}$
E-Modul	69.000 – 150.000	$\frac{N}{mm^2}$
Druckmodul	69.000 – 150.000	$\frac{N}{mm^2}$
Kompressionsmodul	63.400 – 66.600	$\frac{N}{mm^2}$
Streckgrenze	276 – 345	$\frac{N}{mm^2}$
Härte nach Vickers	66,2 – 82,8	<i>HV</i>

Table D.1.: Kohlenstofffaser verstärktes Epoxidharz, Werkstoffdaten (Ashby 2012)

# E. Beschreibung der Abschreibungsmethodiken

## E.1. Leistungsbezogene Abschreibung

Bei der leistungsbezogenen Abschreibung ist die Höhe der Beanspruchung ausschlaggebend für den jährlichen Abschreibungsbetrag. Folglich kann je nach Nutzung der jährliche Abschreibungsbetrag variieren. Nach (Olfert 2003) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$K_{LeA} [EUR] = \frac{B [EUR]}{L} \cdot L_p \quad (E.1)$$

a = Abschreibungsbetrag [EUR]

B = Wert des Gutes [EUR]

L = Gesamtleistung des Anlagengutes [Einheiten/Lebensdauer]

L<sub>p</sub> = Periodenleistung des Anlagengutes [Einheiten/Periode]

Im angegebenen wird als Periode das Jahr angenommen. Die Leistung wird auf die Anzahl der Spiele pro Jahr bezogen. Da die hier vorgenommene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung pro Jahr keine unterschiedliche Leistung annimmt, sondern dies als gleich ansieht, ist die leistungsbezogene Abschreibung vergleichbar mit der linearen Abschreibung und bedarf hier keiner weiteren Betrachtung.

## E.2. Geometrisch-degressive Abschreibung

Die Ermittlung des Abschreibungssatzes wird vergleichbar zur linearen Abschreibung bestimmt, jedoch wird hierbei nicht vom Wert des Gutes ausgegangen, sondern vom jeweiligen (jährlichen) Restwert (Olfert 2003). Der prozentuale Abschreibungssatz wird nach (Olfert 2003) wie folgt bestimmt:

$$P [\%] = 100 \cdot \left( 1 - \sqrt[n]{\frac{R [EUR]}{B [EUR]}} \right) \quad (E.2)$$

Hierbei gilt:

P = Abschreibungssatz [%]

n = Nutzungsdauer in Jahren

B = Wert des Gutes [EUR]

### E. Beschreibung der Abschreibungsmethodiken

R = Restwert entsprechend des Jahres [EUR]

Auf Basis dieser Gleichung ist es zwingend nötig, der Anlage einen gewissen Restwert zuzuweisen, um ein vernünftiges Abschreibungsmodell zu erhalten.

Durch Erhalt der jährlichen prozentualen Abschreibung kann der jährliche Abschreibungsbetrag wie folgt bestimmt werden:

$$K_{GdA,i+1} = K_{GdA,i} \cdot P \quad (\text{E.3})$$

Hierbei gilt:

$i = 0..n$

$K_{GdA,i}$  = jährlicher Abschreibungsbetrag zur Zeit i

$K_0$  = Wert des Gutes

$n$  = Nutzungsdauer in Jahren

### E.3. Arithmetisch-degressive Abschreibung

Nach (Olfert 2003) fallen die jährlichen Abschreibungsbeträge immer um den gleichen Betrag. Um die jährliche Abschreibungsquote D zu bestimmen, bildet man aus der Nutzungsdauer eine Summe der arithmetischen Reihe N und dividiert diese durch den Abschreibungsbetrag B:

$$D = \frac{B}{N} \quad (\text{E.4})$$

Die Abschreibungsquote multipliziert man dann mit der Restnutzungsdauer, um den jährlichen Abschreibungsbetrag für das Ende des Jahres zu erhalten:

$$K_{AdA,i} = D \cdot T_{i-1} \quad (\text{E.5})$$

Hierbei ist T0 der Beginn der Abschreibung.



## F. Eingabeparameter zur Verifizierung des Modells der Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Gemeinsame Parameter			
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
L	Maximaler Fahrweg	m	62,25
H	Maximaler Hubweg	m	13,47
$P_{\text{strom}}$	Strompreis	ct/kWh	11,49
w	Anzahl Arbeitstage im Jahr	Tage	250

Figure F.1.: Gemeinsame Parameter

Szenario 1: Spezifische Daten reales Regalbediengerät			
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$m_F$	Gewicht Fahrwerk	kg	0
$m_M$	Gewicht Mast	kg	0
$m_H$	Gewicht Hubwagen	kg	0
$m_{Mk}$	Gewicht Mastkopf	kg	0
$m_{LAM}$	Gewicht Lastaufnahmemittel	kg	0
$m_A$	Gewicht Anbauteile	kg	0
$m_L$	Gewicht Last	kg	0
$m_{ges}$	Gesamtgewicht	kg	3900
$K_{EW}$	Entwicklungskosten	€	0
$K_I$	Investitionskosten (inkl. Montage)	€	200000
$d$	Abschreibungsdauer	a	15
$E_{Einzel}$	Energiebedarf pro Einzelspiel	Wh	62,066
$E_{Doppel}$	Energiebedarf bei Doppelspiel	Wh	100
$K_{Wtz}$	Wartungskosten	€/Jahr	18000
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$v_x$	Fahrgeschwindigkeit RBG	m/s	5
$v_v$	Hubgeschwindigkeit RBG	m/s	3
$t_{T, Einzel}$	Totzeit beim Einzelspiel*	s	2
$t_{G, Einzel}$	Greifzeit des RBG beim Einzelspiel	s	4,55
$t_{T, Doppel}$	Totzeit beim Doppelspiel*	s	2
$t_{G, Doppel}$	Greifzeit des RBG beim Doppelspiel	s	9,1
$t_{Einzel}$	Dauer eines Einzelspiels	s	12,5
$t_{Doppel}$	Dauer eines Doppelspiels	s	28,2
$t_{RGB}$	mögliche Betriebszeit RBG pro Tag	h	8,0
$M_{Einzel, Max}$	maximale Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	2297
$M_{Doppel, Max}$	maximale Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	1021
$P_{tatsächlich}$	Anteil tats. Betriebszeit RBG pro Tag	%	80
$M_{Einzel}$	Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	1838
$M_{Doppel}$	Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	817

\* für Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- & Kontrollvorgänge

Figure F.2.: Spezifische Daten existierendes RBG

Szenario 2: Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen und gleichbleibender Fahrdynamik			
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$m_F$	Gewicht Fahrwerk	kg	0
$m_M$	Gewicht Mast	kg	0
$m_H$	Gewicht Hubwagen	kg	0
$m_{Mk}$	Gewicht Mastkopf	kg	0
$m_{LAM}$	Gewicht Lastaufnahmemittel	kg	0
$m_A$	Gewicht Anbauteile	kg	0
$m_L$	Gewicht Last	kg	0
$m_{ges}$	Gesamtgewicht	kg	2570
$K_{FW}$	Entwicklungskosten	€	0
$K_I$	Investitionskosten	€	220000
$d$	Nutzungsdauer	a	15
$E_{Einzel}$	Energiebedarf pro Einzelspiel	Wh	43,38
$E_{Doppel}$	Energiebedarf bei Doppelspiel	Wh	70
$K_{Wte}$	Wartungskosten	€	18000
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$v_x$	Fahrgeschwindigkeit RBG	m/s	5
$v_y$	Hubgeschwindigkeit RBG	m/s	3
$t_{T, Einzel}$	Totzeit beim Einzelspiel*	s	2
$t_{G, Einzel}$	Greifzeit des RBG beim Einzelspiel	s	4,55
$t_{T, Doppel}$	Totzeit beim Doppelspiel*	s	2
$t_{G, Doppel}$	Greifzeit des RBG beim Doppelspiel	s	9,1
$t_{Einzel}$	Dauer eines Einzelspiels	s	12,5
$t_{Doppel}$	Dauer eines Doppelspiels	s	28,2
$t_{RGB}$	mögliche Betriebszeit RBG pro Tag	h	8,0
$M_{Einzel, Max}$	maximale Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	2297
$M_{Doppel, Max}$	maximale Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	1021
$P_{tatsächlich}$	Anteil tats. Betriebszeit RBG pro Tag	%	80
$M_{Einzel}$	Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	1838
$M_{Doppel}$	Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	817

\* für Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- & Kontrollvorgänge

Figure F.3.: Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen und gleichbleibender Fahrdynamik

<b>Szenario 3: Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibendem Energiebedarf</b>			
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$m_F$	Gewicht Fahrwerk	kg	0
$m_M$	Gewicht Mast	kg	0
$m_H$	Gewicht Hubwagen	kg	0
$m_{Mk}$	Gewicht Mastkopf	kg	0
$m_{LAM}$	Gewicht Lastaufnahmemittel	kg	0
$m_A$	Gewicht Anbauteile	kg	0
$m_l$	Gewicht Last	kg	0
$m_{ges}$	Gesamtgewicht	kg	2570
$K_{EW}$	Entwicklungskosten	€	0
$K_I$	Investitionskosten	€	220000
$d$	Nutzungsdauer	a	15
$E_{Einzel}$	Energiebedarf pro Einzelspiel	Wh	67,242
$E_{Doppel}$	Energiebedarf bei Doppelspiel	Wh	105
$K_{Wtz}$	Wartungskosten	€	18000
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$v_x$	Fahrgeschwindigkeit RBG	m/s	7
$v_y$	Hubgeschwindigkeit RBG	m/s	4,5
$t_{T, Einzel}$	Totzeit beim Einzelspiel*	s	2
$t_{G, Einzel}$	Greifzeit des RBG beim Einzelspiel	s	4,55
$t_{T, Doppel}$	Totzeit beim Doppelspiel*	s	2
$t_{G, Doppel}$	Greifzeit des RBG beim Doppelspiel	s	9,1
$t_{Einzel}$	Dauer eines Einzelspiels	s	10,5
$t_{Doppel}$	Dauer eines Doppelspiels	s	23,2
$t_{RGG}$	mögliche Betriebszeit RBG pro Tag	h	8,0
$M_{Einzel, Max}$	maximale Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	2732
$M_{Doppel, Max}$	maximale Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	1243
$P_{tatsächlich}$	Anteil tats. Betriebszeit RBG pro Tag	%	80
$M_{Einzel}$	Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	2186
$M_{Doppel}$	Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	994

\* für Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- & Kontrollvorgänge

Figure F.4.: Spezifische Daten RBG mit gewichtsreduzierenden Maßnahmen bei gleichbleibendem Energiebedarf

bei <b>gleichbleibender Spielzeit</b> wirtschaftlicher nach:	<b>-26.490.601 Einzelspielen</b>
	<b>-14414 Tagen</b>
	<b>-39,5 Jahre</b>
bzw.	<b>-6.490.242 Doppelspielen</b>
	<b>-7945 Tagen</b>
	<b>-21,8 Jahre</b>
bei <b>gleichbleibender Leistung</b> wirtschaftlicher nach:	<b>2.557.330 Einzelspielen</b>
	<b>1170 Tagen</b>
	<b>3 Jahre</b>
bzw.	<b>933.748 Doppelspielen</b>
	<b>939 Tagen</b>
	<b>3 Jahre</b>

Figure F.5.: Darstellung der Ergebnisse



## **G. Ausgewählte Eingabemasken des Modells der Berechnung zur Wirtschaftlichkeit**

<b>Szenario 2: Spezifische Daten Regalbediengerät bei neuartigem Werkstoff und gleichbleibender Fahrdynamik</b>			
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$m_F$	Gewicht Fahrwerk	kg	
$m_M$	Gewicht Mast	kg	
$m_H$	Gewicht Hubwagen	kg	
$m_{Mk}$	Gewicht Mastkopf	kg	
$m_{LAM}$	Gewicht Lastaufnahmemittel	kg	
$m_A$	Gewicht Anbauteile	kg	
$m_L$	Gewicht Last	kg	
$m_{ges}$	Gesamtgewicht	kg	
$K_{EW}$	Entwicklungskosten	€	
$K_I$	Investitionskosten	€	
$d$	Nutzungsdauer	a	
$E_{Einzel}$	Energiebedarf pro Einzelspiel	Wh	
$E_{Doppel}$	Energiebedarf bei Doppelspiel	Wh	
$K_{Wte}$	Wartungskosten	€	
Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$v_x$	Fahrgeschwindigkeit RBG	m/s	
$v_y$	Hubgeschwindigkeit RBG	m/s	
$t_{T, Einzel}$	Totzeit beim Einzelspiel*	s	
$t_{G, Einzel}$	Greifzeit des RBG beim Einzelspiel	s	
$t_{T, Doppel}$	Totzeit beim Doppelspiel*	s	
$t_{G, Doppel}$	Greifzeit des RBG beim Doppelspiel	s	
$t_{Einzel}$	Dauer eines Einzelspiels	s	
$t_{Doppel}$	Dauer eines Doppelspiels	s	
$t_{RGB}$	mögliche Betriebszeit RBG pro Tag	h	
$M_{Einzel, Max}$	maximale Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	
$M_{Doppel, Max}$	maximale Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	
$P_{tatsächlich}$	Anteil tats. Betriebszeit RBG pro Tag	%	
$M_{Einzel}$	Anzahl Einzelspiele pro Tag	Stk	
$M_{Doppel}$	Anzahl Doppelspiele pro Tag	Stk	

\* für Positionierung, Platzkontrolle, Schalt- & Kontrollvorgänge

Figure G.1.: Eingabemaske für Daten (Beispielhaft für Regalbediengerät bei neuartigem Werkstoff und gleichbleibender Fahrdynamik)



## **H. Detaillierte Daten der Bewertung**

H. Detaillierte Daten der Bewertung

Kosten	Wirtschaftlichkeit in Anzahl Spiele	Wirtschaftlichkeit in Tagen	Wirtschaftlichkeit in Jahren
150.000	0	0	0
151.000	640.572	587	1,6
152.000	1.281.143	1.174	3,2
153.000	1.921.714	1.761	4,8
154.000	2.562.285	2.368	6,4
155.000	3.200.856	2.935	8,0
156.000	3.843.427	3.522	9,6
157.000	4.483.998	4.109	11,3
158.000	5.124.569	4.696	12,9
159.000	5.765.140	5.283	14,5
160.000	6.405.712	5.870	16,1

Table H.1.: Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 1.500kg

Kosten	Wirtschaftlichkeit in Anzahl Spiele	Wirtschaftlichkeit in Tagen	Wirtschaftlichkeit in Jahren
150.000	0	0	0
150.500	1.281.143	1.174	3,2
151.000	2.562.285	2.348	6,4
151.500	3.843.427	3.522	9,6
152.000	5.124.569	4.696	12,9
152.500	6.405.712	5.870	16,1

Table H.2.: Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 3.000kg

ROI [a]	1.000 EUR	2.000 EUR	3.000 EUR	4.000 EUR	5.000 EUR
5	13,0 ct	25,5 ct	38,6 ct	51,5 ct	64,3 ct
10	6,5 ct	13,0 ct	19,3 ct	25,7 ct	32,2 ct
15	4,2 ct	8,6 ct	12,9 ct	17,2 ct	21,4 ct

Table H.3.: Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 500 kg Gewichtsersparnis

ROI [a]	1.000 EUR	2.000 EUR	3.000 EUR	4.000 EUR	5.000 EUR
5	3,2 ct	6,4 ct	9,6 ct	12,9 ct	16,1 ct
10	1,6 ct	3,2 ct	4,8 ct	6,4 ct	8,0 ct
15	1,1 ct	2,1 ct	3,2 ct	4,3 ct	5,4 ct

Table H.4.: Konstante Investition, Angabe des Strompreises bei 2.000 kg Gewichtsersparnis

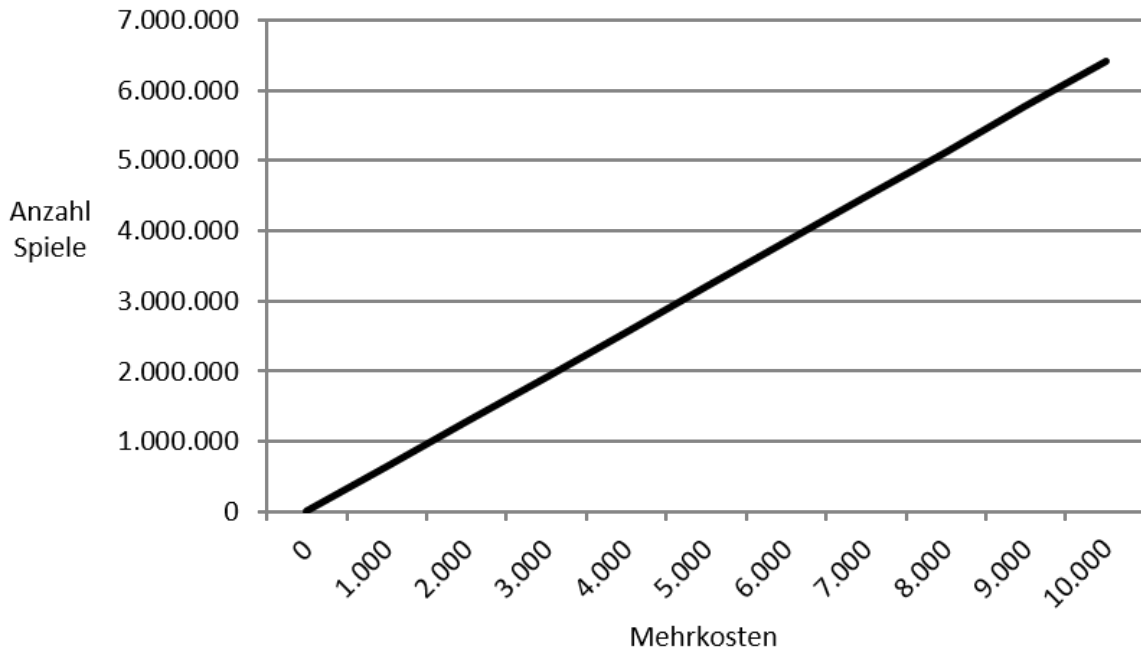


Figure H.1.: Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 1.500kg

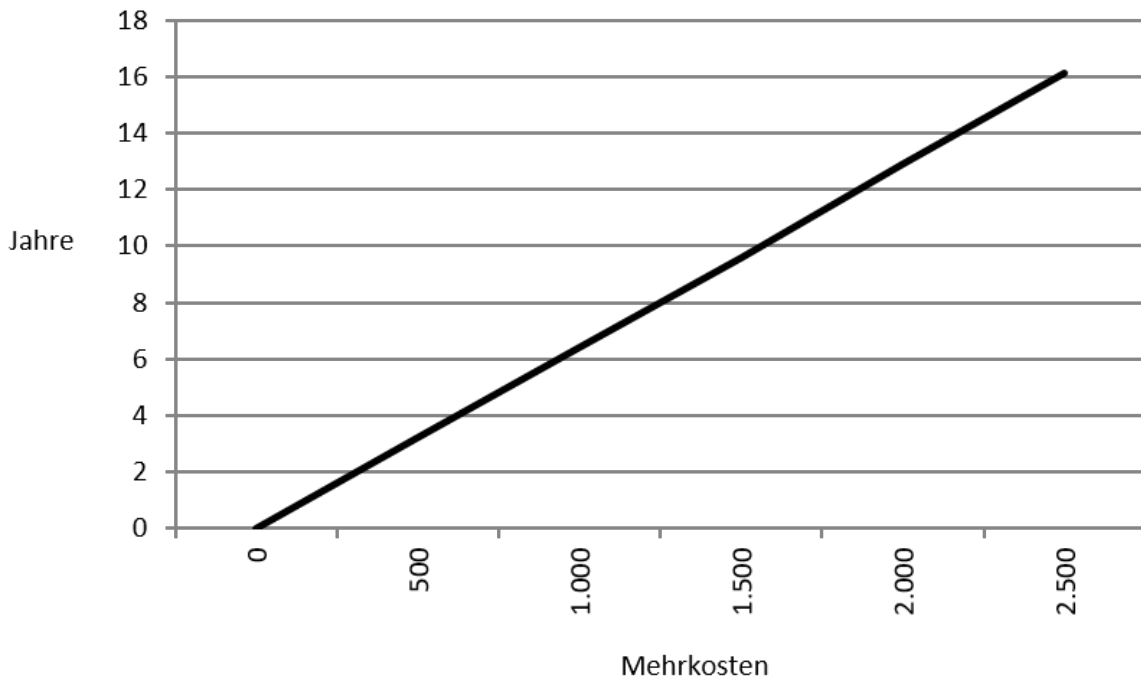


Figure H.2.: Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 3.000kg

## H. Detaillierte Daten der Bewertung

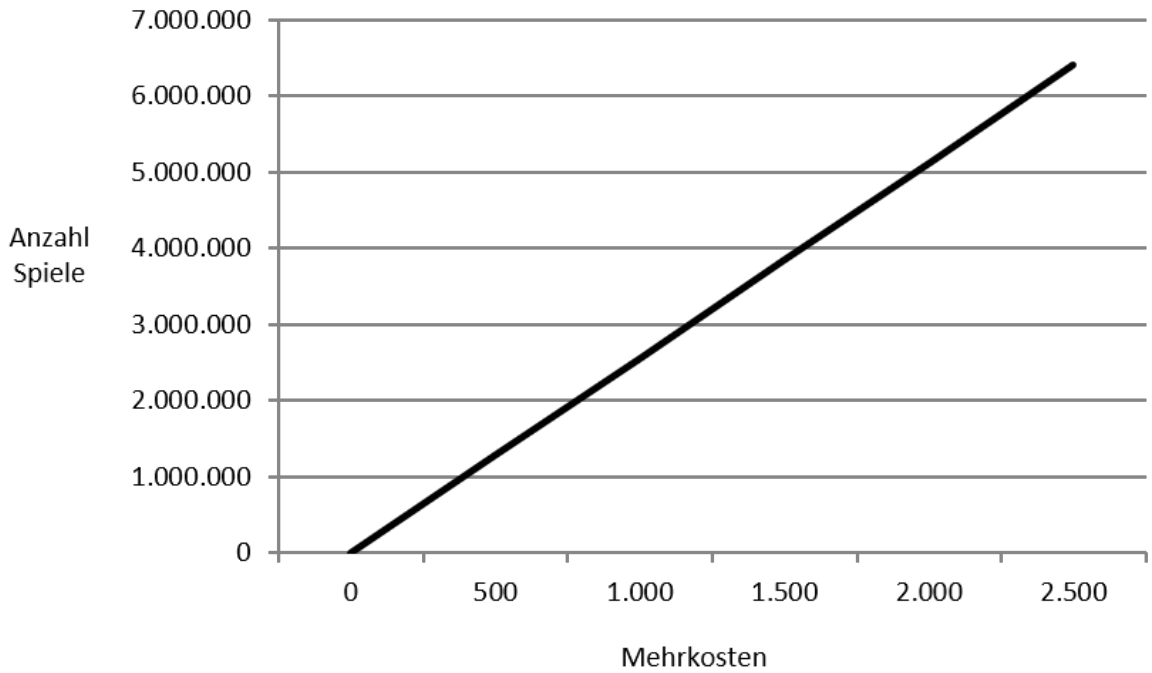


Figure H.3.: Mehrkosten im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit bei einer Gewichtsreduzierung von 3.500kg auf 3.000kg

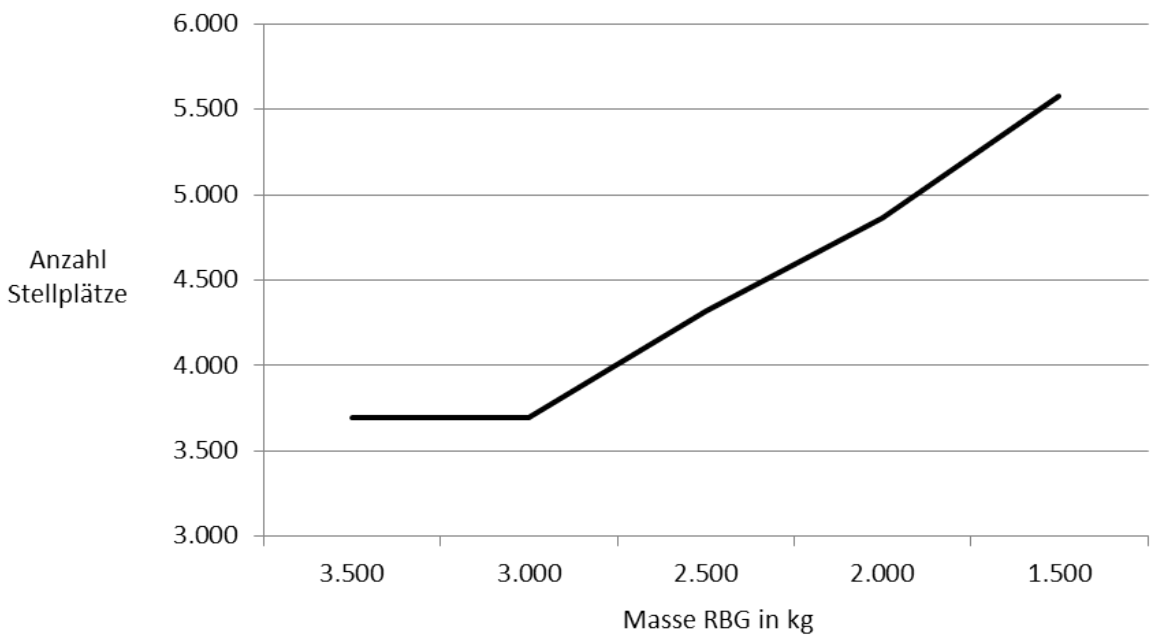


Figure H.4.: Anzahl Stellplätze bei Minimierung der Masse und gleichem Stromverbrauch