

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19569 BR

Thema

Integratives Konzept für ein Flurförderzeug-Hubgerüst mit elektrischen Antrieben

Berichtszeitraum

01.09.2017 bis 29.02.2020

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden

Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme

Professur für Technische Logistik

Dresden, den 28.02.2020

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Allgemeiner Hinweis

Bei der projektausführenden Stelle kam es zu Beginn des Vorhabens zu Verzögerungen bei der Besetzung der zugehörigen Stelle. Eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsvorhabens wurde beantragt und vom Fördermittelgeber stattgegeben. Des Weiteren kam es während des Projektverlaufs zu Verzögerungen, sodass eine kostenneutrale Projektverlängerung um 9 Monate beantragt und vom Fördermittelgeber bewilligt wurde. Der neue Bewilligungszeitraum ist vom 01.09.2017 bis 29.02.2020.

Kurzfassung

Im Forschungsvorhaben wurden Konzepte für Flurförderzeug-Hubgerüste, die ausschließlich elektrisch-mechanisch betrieben werden, entwickelt und miteinander verglichen. Eine Besonderheit ist, dass der äußere Hubrahmen in Längsrichtung verschoben wird und der innere fest mit dem Rahmen des Flurförderzeugs verbunden ist. Es wurden neuartige Lösungen für die Gestaltung des Antriebs – Motor mit Steuerung, Übertragungsglied, Bremse – gefunden. Als Übertragungsglied dient ein Zugmittel, das sich innerhalb des Rahmens befindet. In der Vorzugsvariante werden die folgenden Komponenten verbaut. Ein längenoptimierter, synchroner Servo-Getriebemotor wird von einem Umrichter gesteuert. Neu ist, dass eine Schubkette als Übertragungsglied die Antriebsenergie des Motors über den äußeren Hubrahmen auf den Gabelträger überträgt. Zum Halten der Last dient eine Lösebremse, die an der Antriebswelle angreift. Die Komponenten werden zu einer sehr kompakten Antriebseinheit zusammengesetzt. Das entwickelte Flurförderzeug-Hubgerüst besteht nur aus wenigen Verschleißteilen und hat eine geringe Eigenmasse, die sich günstig auf die Standsicherheit auswirkt. Die Vorzugsvariante wurde sowohl in einem parametrisierbaren Simulationsmodell als auch an einem Demonstrator mit folgenden Kenngrößen umgesetzt: Tragfähigkeit 1000 kg, maximale Hubhöhe 2,0 m, Freihub 0,83 m, maximale Hubgeschwindigkeit 0,3 m/s. In Tests am Demonstrator wurden die Funktionsfähigkeit des Konzepts nachgewiesen und das Modell validiert. So wird sichergestellt, dass die Ergebnisse sich auf weitere Baugrößen übertragbar sind. Zur Erhöhung der Energieeffizienz ist im Antriebskonzept die Rückgewinnung von potentieller und kinetischer Energie in einen Speicherkondensator integriert. Im Ergebnis konnte der größte Anteil an Bremsenergie gegenüber der Antriebsenergie von 38,6 % bei einer Geschwindigkeit von 0,13 m/s und einer Nutzmasse von 900 kg ermittelt werden. Ferner zeigt sich, dass die Rekuperation nicht nur eine nutzmassen- und geschwindigkeitsabhängige Größe ist, sondern auch von der Position der Nutzmasse auf dem Gabelträger. Je nach Abstand der Nutzmasse zum Gabelträger ergibt sich ein Biegemoment auf den Fahrmast, was die Reibung in den Gleitlagern beeinflusst. Aktuelle Rekuperationen hydraulischer Hubgerüste liegen um die 40 %. Der Vergleich mit konventionellen Hubgerüsten mit hydraulischem Antrieb zeigt, dass das entwickelte Elektrohubgerüst insbesondere bei Hochhubwagen und kleinen Gabelstaplern mit Einfach- sowie Zweifachteleskop-Hubgerüst Anwendung finden kann. Das Ziel des Vorhabens, ein integratives Konzept für ein elektrisch-mechanisches Hubgerüst zu finden, wurde erreicht.

1 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen.

Die aufgeführten Arbeitspunkte entsprechen den Arbeitspunkten des Projektantrages. Die durchgeführten Arbeiten in den Arbeitspunkten führen zur Erreichung der Zielstellung.

1.1 AP 1: Spezifikation der Anforderungen

1.1.1 Durchgeführte Arbeiten:

- Recherche zu Parametern von Hubgerüsten für Hochhubwagen sowie kleinen Gabelstaplern
- Vergleich und Bewertung der Anforderungen
- Festlegung von Parametern für das geplante Hubgerüst

1.1.2 Erzielte Ergebnisse:

Das geplante Hubgerüst soll in Hochhubwagen sowie in kleinen Gabelstaplern mit einer teleskopierbaren Einheit Anwendung finden. Im Ergebnis wurden die Parameter für das geplante Hubgerüst auf Grundlage der Recherchen festgelegt und in einer Anforderungsliste zusammengefasst, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Anforderungsliste für das Elektrohubgerüst

Bewertung	Anforderung
	Bauart
F	Zweifachteleskop-Hubgerüst
F	elektrisch-mechanischer Betrieb
W	Tragkraft 1000 kg
F	Hubhöhe 2 Meter
M	Hubgeschwindigkeit 0,5 m/s
F	Senkgeschwindigkeit 0,5 m/s
	Prozessablauf
W	Ansteuerung mit nur einem Motor
F	Rekuperation beim Senken
	Konstruktion
F	kompakte Bauweise
W	möglichst geringe Masse
W	geringer Wartungsaufwand
W	Austauschbarkeit der Teile
M	integrierte Bauteile
W	Anschlussmöglichkeit am Gabelträger
	Sicherheit
F	Not-Stopp-Funktion
F	Sicherheit bei Stromausfall
F	gegen unkontrollierter Lastabsenkung

Legende	
Festforderung	F
Mindestforderung	M
Wunsch	W

Fortsetzung Tabelle 1

	Ergonomie
W	gute Sichtbarkeit
W	gutes Handling

1.1.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 1 mit dem Ziel

Das Ergebnis des Arbeitspaketes, eine Anforderungsliste auf Grundlage umfangreicher Recherchen, entspricht dem Projektziel.

1.2 AP 2: Konzeptanalyse

Die Konzeptanalyse untersucht die Hauptbestandteile des Elektrohubgerüsts. Sie besteht aus Teilanalysen zur Antriebs- und Rekuperationstechnik, zum Hubrahmen, zum Zugmittel sowie zur Haltefunktion.

1.2.1 Durchgeführte Arbeiten

- Analysen zu Elektromotoren
- Analysen zu Zugmitteln
- Analysen von Hubprofilen und der Hubrahmengestaltung
- Analysen zur Hubrahmenführung und zur Führung des Gabelträgers
- Erarbeitung des Antriebskonzepts
- Analysen zum Halten und Bremsen der Last
- Gegenüberstellung der Antriebskonzepte sowie der Konzepte zum Halten der Last
- Bewertung der Konzepte mit dem Ergebnis eines favorisierten Konzeptes
- Erstellen des Rekuperationskonzeptes

1.2.2 Erzielte Ergebnisse:

Hubrahmenanalyse

Die Hubrahmenanalyse umfasst nicht nur die geometrische Form der jeweiligen Hubprofile, sondern auch deren Führung zueinander, deren Arbeitsabfolge, das Schaffen von Raum zur Integration der Zugmittel und Sicherheits- sowie Haltefunktionen. Unter Maßgabe der Anforderungen aus AP 1 steht im Ergebnis ein Ansatz für eine Neugestaltung der Hubrahmenprofile. Im Gegensatz zu klassischen Hubgerüsten, bei dem der äußere Hubrahmen fixiert ist und der innere ausfährt, soll das Elektrohubgerüst genau entgegengesetzt verfahren. Im Sinne der Flexibilität und des Handlings soll es nicht zwei gegenüberstehende Hubrahmenprofile geben, sondern nur einen zentralen Hubmast, bei dem der äußere, bewegliche Hubrahmen den inneren umschließt. Der ausfahrende Hubrahmen ist folglich größer als der fixierte. Größere Profile besitzen eine größere Steifigkeit und können dadurch leichter ausgeführt werden, was sich beim Ausfahren des Elektrohubgerüsts auf die Schwerpunktlage positiv auswirkt. Als

Querschnitte für die Hubrahmen kommen viereckige sowie runde Formen als auch Polygone in Betracht. Insbesondere bei Querschnitten mit einem viereckigen inneren Hubrahmen und einem vieleckigen äußeren Hubrahmen können Bauräume gestaltet werden, welche die Integration aller mechanischen Funktionen im Hubgerüst ermöglicht. Kreisrunde Querschnitte haben zusätzlich den Aufwand, dass eine Sicherung gegen Verdrehen um die vertikale Achse vorgenommen werden muss und die Befestigung der mechanischen Funktionen aufgrund fehlender ebener Flächen erschwert wird. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht zu möglichen Hubrahmenformen und Hubrahmenkonstellationen

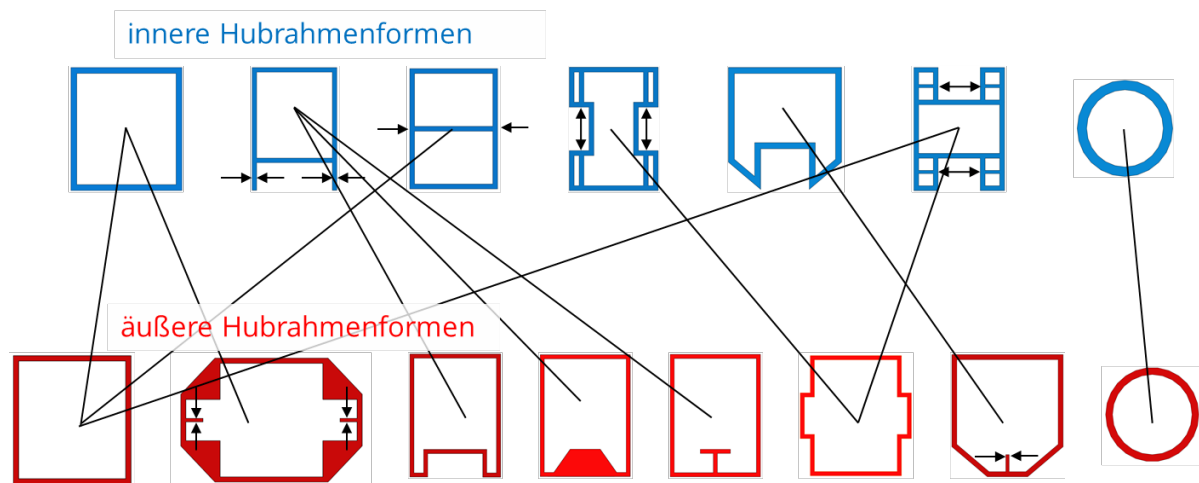


Abbildung 1: Analyzierte Hubrahmenkonstellationen mit berücksichtigten Haltemöglichkeiten durch elektromechanische Bremsen (Keine maßstabsgetreue Darstellung)

Zugmittelanalyse

Zugmittel, das sind Riemen, Seile oder Ketten, haben sich in der Praxis zum Heben von Lasten bewährt. Insbesondere Riemen, sie können als Zahn- oder Flachriemen im Elektrohubgerüst vorkommen, stehen wegen ihrer Wartungsfreundlichkeit positiv hervor. In Verbindung mit dem Konzept für das Hubgerüst werden auch Zugmittelspeicher erforderlich sein. Das Speichern von Zugmitteln unter Last führt zu erhöhtem Verschleiß. Dieser kann ggf. durch konstruktive Möglichkeiten verringert werden, indem die Belastung des Zugmittels vor dem Speichern durch entsprechende Klemmmechanismen vermindert wird.

Die Relativbewegung zwischen den beiden Hubrahmen bzw. zwischen dem Gabelträger und dem äußeren Hubrahmen kann durch eine Wälz- oder Gleitlagerung erfolgen. Wälzlagerungen haben den Vorteil, dass sie ein konstant geringes Reibungsverhalten aufweisen, auch beim An- und Auslauf der Relativbewegung. Für das Hubgerüstkonzept überwiegen die Vorteile des Gleitlagers gegenüber der Wälzlagerung, z. B. geringeres Gewicht, geringere Kosten, kleinerer und einfacher Bauraum, sodass eine Tendenz zu dieser Lagerung gesehen werden kann.

Analyse der Haltefunktion

Die Lasthaltefunktion kann unmöglich vom Elektromotor realisiert werden, sondern muss durch entsprechende Haltefunktionen, z. B. Bremsen, realisiert werden. Ziel ist es, dass diese Bremsen nicht nur die Aufgabe des Lasthaltens übernehmen, sondern auch der Not-Stopp-Funktion. Bei Stromausfall bzw. bei Stillstand des Hubgerüsts sollen die Bremsen betätigt sein, da Hubgerüste häufiger im angehoben Zustand verharren, z. B. Fahren mit angehobenem Hubmast oder Verladen von Gütern mit angehobenem Hubmast zur besseren Ergonomie, als die reinen Hub- und Senkbewegungen. Diese Bremsen können an unterschiedlichen Orten im Hubgerüst angebracht werden. Das Bremsen bzw. Halten der Hubrahmen bewirkt eine Entlastung der Zugmittel. Beim Bremsen am Motor oder am Zugmittel würde eine indirekte Sicherung erfolgen, wodurch es im Schadensfall eines oder mehrerer Zugmittel zum unkontrollierten Absturz des Hubrahmens sowie Gabelträgers kommen kann.

Das Halten der Last kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, siehe Abbildung 2:

- Eine elektromagnetische Bremse wirkt auf eine Kolbenstange. Die Kolbenstange ist am äußeren Hubrahmen fixiert und wird durch die Bremse, die am inneren Hubrahmen befestigt ist, gebremst (Abbildung 2a).
- Das Zugmittel wird durch Klemmkeile verklemmt. Das Schließen und Öffnen der Bremse erfolgt über Linearmotoren (Abbildung 2b).
- Eine formschlüssige Verbindung wird durch eine Verzahnung auf einer separaten Schiene an den Hubrahmen hervorgerufen. Die Ansteuerung erfolgt durch Hubmagnete (Abbildung 2c).
- Eine formschlüssige Verbindung wird durch eine Verzahnung auf einer separaten Schiene an den Hubrahmen hervorgerufen. Die Ansteuerung erfolgt durch Drehmagnete und die Arretierung durch Exzenter (Abbildung 2d).
- Eine elektromagnetische Bremse wirkt auf die Ausgangswelle des Elektromotors (Abbildung 2e).

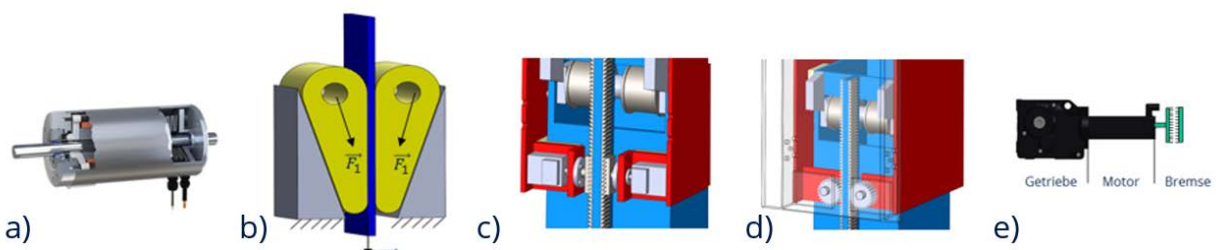


Abbildung 2: Konzepte zum Halten der Last: a) Kolbenbremse b) Verklemmen des Zugmittels c) Formschluss durch Zahnstange d) Formschluss durch Exzenter e) Federspeicherbremse im Getriebemotor

Antriebs- und Rekuperationstechnik

Die Effizienz einer Anlage wird erhöht, wenn die freiwerdende Energie, wie sie beispielsweise beim Bremsen vorkommt, gespeichert wird und anschließend der Anlage wieder zur Verfügung steht. Diese Art der Energierückgewinnung wird auch als

Rekuperation bezeichnet, die beim Elektrohubgerüst beim Senken des Gabelträgers umgesetzt werden soll. Als elektrische Antriebe eignen sich zur Rekuperation besonders permanenterregte Servomotoren, da sie u. a. einen großen Drehzahl- und Drehmomentenbereich bei kompakter Abmessung abdecken. Die kostengünstigeren Asynchronmotoren sind prinzipiell auch möglich, sie fordern nur einen größeren Platzbedarf als ein vergleichbarer Synchronmotor. Da für das Heben der Last ein großes Moment erwartet wird, wird auch die Variante mit Getriebe in Betracht gezogen, um die Abmessungen und Masse der Antriebseinheit zu optimieren.

Das Antriebskonzept schließt die Gestaltung des Zugmittels – in Frage kommen Flachriemen, Zahnriemen und Ketten – ein und beeinflusst maßgeblich das Verhalten des Hubgerüsts. In Rücksprache mit Anwendern und Herstellern von Flurförderzeugen wird ein Freihub gewünscht, der aber nicht in jedem Antriebskonzept umsetzbar ist. Konzepte mit Scherenhubtischen wurden aufgrund der hiesigen erforderlichen Bauraums nicht weiterverfolgt. Konzepte mit faltspindeln ermöglichen zwar eine sehr kompakte Baugröße, aber sie benötigen einen erforderlichen Mindestdruck auf die Federbleche, der aber beim Kommissionieren der Last nicht garantiert werden kann. Unter Umständen liegt der Gabelträger beim Senkbetrieb auf, es wirkt eine Zugkraft auf die faltspindeln und das Federpaket löst sich auf, wodurch die Last unkontrolliert abstürzt. Auch dieses Konzept wird aus Aspekten der Sicherheit nicht weitergeführt. Neben einer Vielzahl an Antriebskonzepten seien 5 Konzepte genannt, die in Abbildung 3 dargestellt sind.

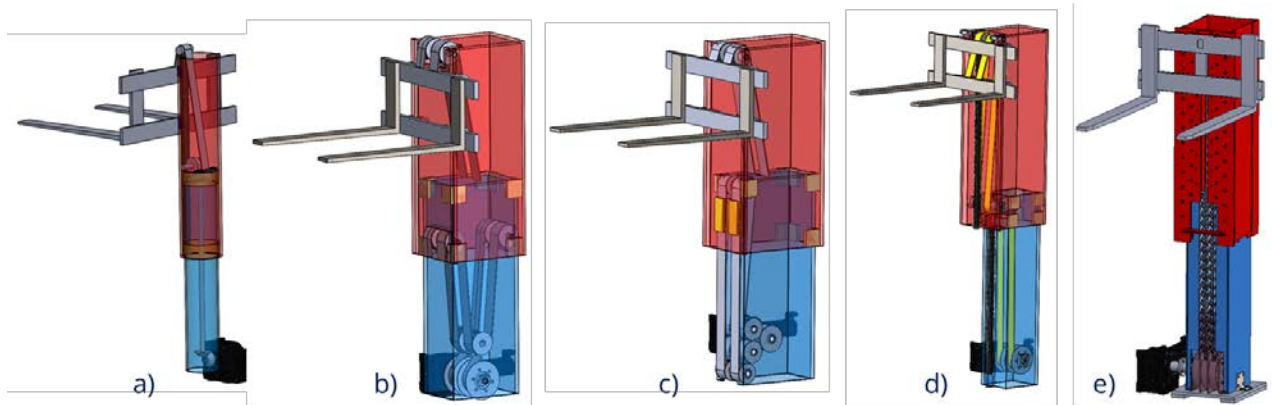


Abbildung 3: Ausgewählte Antriebskonzepte a) Getriebe b) lose Rolle c) Omega-Antrieb d) ein endlicher Riemen e) Doppelschubkette.

Abbildung 3a zeigt eine kompakte Bauform bei runden Hubrahmenprofilen, in der eine Kardanwelle die Antriebskraft auf ein Getriebe überträgt. Dieses Getriebe treibt eine Zahnstange an, mit der der äußere Hubrahmen bewegt wird. Da das Zugmittel für den Gabelträger mit dem inneren Hubrahmen, den Standmast, verbunden ist, bewegt sich der Gabelträger immer zusammen mit dem äußeren Hubrahmen, den Fahrmast. Abbildung 3b zeigt eine sehr kompakte Lösung, bei der ein angetriebener Zugmittelspeicher für Flachriemen eine lose Rolle bewegt. Dabei wird ein weiterer Flachriemen bewegt, der den äußeren Hubrahmen verschiebt. Am Kopf des inneren Hubrahmens ist ein Flachriemen für den Gabelträger befestigt, sodass bei einer

Bewegung des äußeren Hubrahmens der Gabelträger mit bewegt wird. In Abbildung 3c werden die Hubrahmen durch einen Omega-Antrieb mit Zahnriemen angetrieben, der Gabelträger durch einen Flachriemen. Die Zahnriemen sind zwar sehr wartungsarm, aber sie benötigen etwas mehr Bauraum, bedingt durch größere Durchmesser der Umlenkrollen. Durch die Fixierung des Flachriemens für den Gabelträger bewegen sich auch in Abbildung 3c Gabelträger und äußerer Hubrahmen immer gleichzeitig. In Abbildung 3d erfolgt die Bewegung von Hubrahmen und Gabelträger durch einen endlichen Flachriemen, der sich am inneren und äußeren Hubrahmen abstützt. Zunächst wird der Gabelträger bewegt, dann wird der äußere Hubrahmen mit teleskopiert. Dieses System ist statisch unbestimmt, sodass zunächst die Masse angehoben wird, die am leichtesten ist. Ist der Gabelträger mit Nutzmasse leichter als der Fahrmast, fährt zuerst der Gabelträger aus und teleskopiert den Fahrmast. Ist der Fahrmast leichter als der Gabelträger mit Nutzmasse, dann fährt der Gabelträger mit Fahrmast aus zeitgleich aus. Um letzteres zu unterbinden, müssen zwischen den Hubstufen der Gabelträger und die Hubrahmen wechselseitig arretiert werden, da zwischen dem Gabelträger und dem äußeren Hubrahmen die Gefahr eines Massenausgleichs besteht. Dieses Konzept ist, aufgrund dieser erforderlichen Sperrfunktion, sehr kompliziert und benötigt viel Bauraum. Abbildung 3e wird durch eine Doppelschubkette betrieben. Ein Ende der Doppelschubkette ist mit dem Gabelträger verbunden und drückt diesen nach oben. Durch entsprechende Anschläge wird in einer weiteren Hubstufe der äußere Hubrahmen teleskopiert. Dieses Konzept ist sehr kompakt, einfach steuerbar und hat den Vorteil, dass die Schubkette die Hauptbelastung übernimmt, sodass die Hubrahmen leichter dimensioniert werden können. Mit den Konzepten aus Abbildung 3a, 3b und 3c ist kein Freihub möglich, weil Gabelträger und Hubrahmen gleichzeitig bewegt werden. Die Konzepte aus Abbildung 3d und 3e realisieren einen Freihub

Das Rekuperationskonzept sieht die Steuerung des Hubgerüsts unter Einbeziehung der Energierückgewinnung (Rekuperation) vor, wobei das Messen der zurückgeführten Leistung im Fokus steht, nicht die Energiespeicherung. Zum Messen der Rekuperationsleistung wurden folgende Möglichkeiten untersucht: Das Verheizen der Senkenergie durch einen Bremswiderstand, die Rückführung ins örtliche Stromnetz oder die Speicherung in einen Kondensator bzw. Batterie. Im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschusses wurde eine Speicherung in einen Kondensator favorisiert, weil es den künftigen Einsatz des Hubgerüsts unter vertretbarem Aufwand am besten abbildet. Zusätzlich sollen Untersuchungen in einen Bremswiderstand stattfinden, um Vergleiche zwischen den Rekuperationstechniken zu ziehen.

Variantenbildung

Um das Ziel ein Konzept für ein Flurförderzeug-Hubgerüst zu erreichen, kristallisierten sich die Konzepte für den Antrieb sowie zum Halten der Last heraus. Beide Konzepte beinhalten die Analysen zu Hubrahmen und Zugmittel, da sie bei der Gestaltung des Hubgerüstkonzepths voneinander abhängen.

Das Lasthaltekonzept, dargestellt in Abbildung 2, kann, aufgrund der vorangegangenen Recherchen, quantitativ eingeschätzt werden. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4 dargestellten Diagramme. beim Lasthaltekonzept am Getriebemotor wird nur eine Bremse benötigt, da sie die Last noch vor der Drehmomentenübersetzung hält. Dadurch kann diese Bremse kleiner dimensioniert werden. Die anderen Konzepte aus Abbildung 2 benötigte mehrere Bremsen.

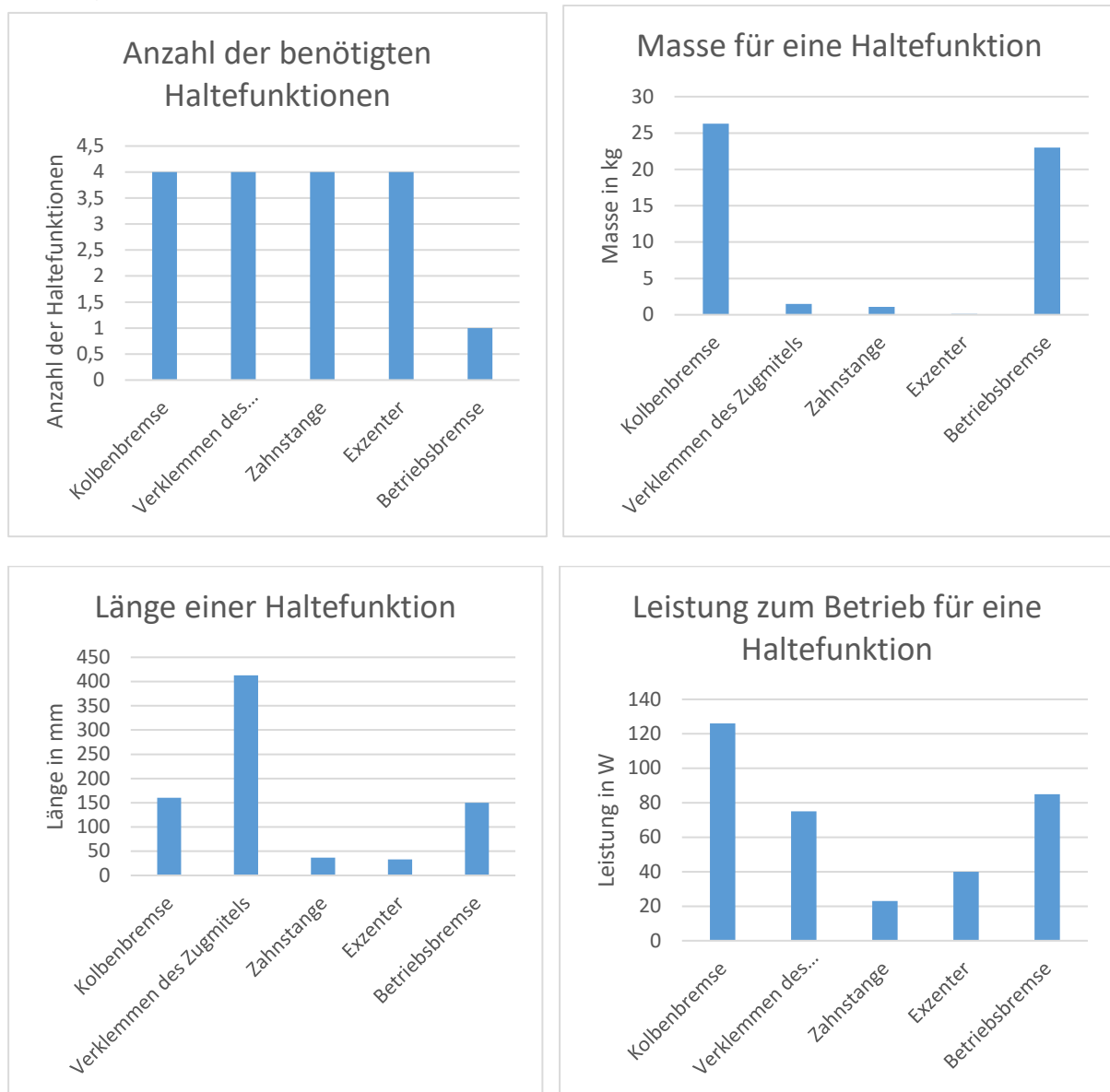


Abbildung 4: Quantitative Einschätzung zu Parametern der Lasthaltefunktion

Auf Grundlage der quantitativen Recherchen ergeben sich folgende Kriterien für die Bewertung: kompakte Bauweise, Eigenmasse, Reaktionsgeschwindigkeit, Positioniergenauigkeit, Handhabung im Betrieb, konstruktiver Aufwand, Sicherung bei Zugmittelbruch, Verschleiß des Zugmittels und die Leistung, die zur Ansteuerung der Haltefunktion benötigt wird. Diese Kriterien wurden anhand der Analysen gewichtet und bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung für die Lasthaltefunktion ist in Abbildung 5

dargestellt. Das Konzept mit der Betriebsbremse im Antriebsmotor erhält die meisten Punkte und wird für das favorisierte Konzept vorgesehen.



Leistung zur Ansteuerung d. Bremse		4 x 126 W	4 x 30 W	4 x 7 W	2 x 30 W	1 x 85 W
Masse d. Bremse		4 x 26.000 g	4 x 1300 g	4 x 85 g	2 x 85 g	1 x 30.000 g
Wich- tung	Kriterien	Kolbenstangen- bremse	Verklemmen des Zugmittels	Bremsen durch Formschluss mittels Sägezahn	Bremsen durch Formschluss mittels Exzenter	Federkraftbremse am E-Motor
0,65	kompakte Bauweise	1	4	3	3	4
0,29	Eigenmasse	1	4	5	5	3
0,47	Reaktionsgeschwindigkeit	5	2	4	4	5
0,71	Positioniergenauigkeit	5	2	2	1	5
0,88	Handhabung im Betrieb	5	1	3	2	5
0,47	konstruktiver Aufwand	3	5	3	3	5
0,06	Sicherung bei Zugmittelbruch	5	1	5	5	1
0,18	Verschleiß, Zugmittel	5	1	5	5	3
1,00	Leistung	1	3	5	4	4
Summe		14,8	12,6	16,9	14,4	20,7

Abbildung 5: Gewichtete Punktbewertung der unterschiedlichen Konzepte zum Halten der Last.

Die unterschiedlichen Konzepte für den Antrieb wurden simulativ nachgebildet, wodurch sich quantitative Aussagen zur zu bewegenden Masse – z. B. Zugmittel, Umlenkrollen, Achsen, Wellen, Lager, Hubrahmen – zum Querschnitt des Fahrmasts, zur Energieeffizienz des Antriebssystems sowie Abschätzungen zur Komplexität und Wartungsaufwand, ergeben, siehe Abbildung 6.

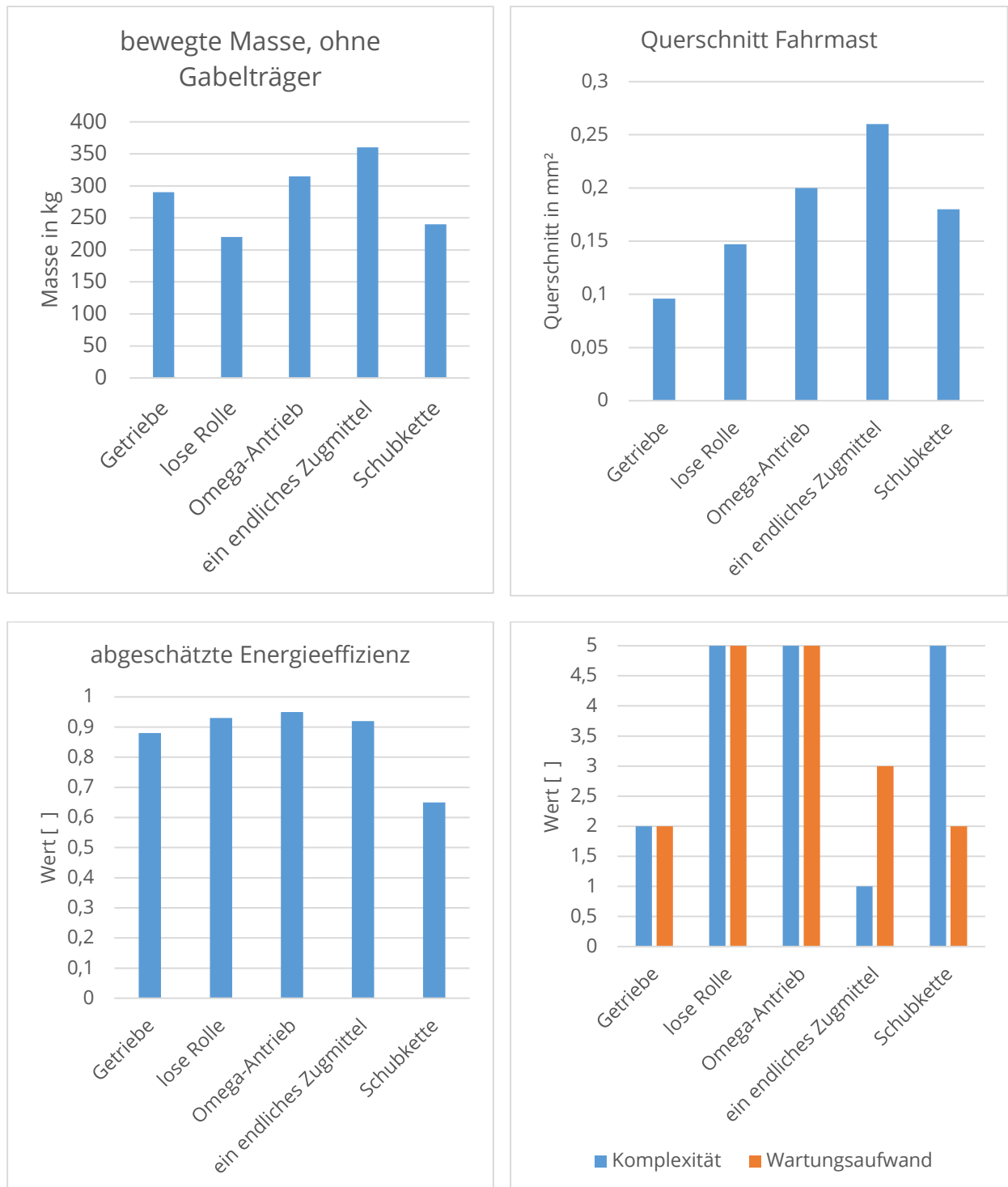


Abbildung 6: Quantitative Vergleiche der erstellten Antriebskonzepte

Anhand der Anforderungsliste sowie der erstellten CAD-Modelle ergeben sich Kriterien, aus denen eine gewichtete Punktbewertung zu den Antriebskonzepten erfolgt. Die Kriterien ergeben sich absteigend nach ihrer Wichtigkeit: Freihub, Abmessungen, Komplexität, Teileanzahl, Wartung, Wirkungsgrad des Zugmittels, konstantes Antriebsdrehmoment, abschätzbare Eigenmasse. Die Bewertung des Antriebskonzepts ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Antriebskonzept mit Schubkette erzielt die meisten

Punkte und wird, gemeinsam mit dem favorisierten Konzept zum Halten der Last, für das Konzept für ein Flurförderzeug-Hubgerüst ausgewählt, dimensioniert und zu einem Prüfstand umgesetzt.

	Kriterien	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4	Konzept 5
		Getriebe	Lose Rolle	Omega-Antrieb	endlicher Riemen	Schubkette
	vorl. Querschnitt äußerer Hubrahmen	ca. \varnothing 400 mm	ca. 370 mm x 500 mm	ca. 500 mm x 600 mm	ca. 378 mm x 670 mm	ca. 340 mm x 504 mm
Wichtung						
0,867	Abmessungen	3	5	1	2	5
1,000	Freihub	5	1	1	5	5
0,200	konstantes Antriebsmoment	1	1	5	5	5
0,400	Wartung	2	5	5	3	2
0,667	Komplexität	2	5	3	1	5
0,067	abschätzbare Eigenmasse	2	5	3	3	2
0,667	Teileanzahl	2	4	3	1	5
0,400	Wirkungsgrad Zugmittel	3	4	5	5	2
	Summe	11,2	13,3	8,8	10,5	17,5

Abbildung 7: Bewertung der Antriebskonzepte

1.2.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 2 mit dem Ziel

Die Ergebnisse zu den Analysen zu Zugmitteln, zu Hubrahmenprofilen, zu Funktionen zum Halten der Last und zum Antrieb sowie zur Rekuperation entsprechen den Zielen des Projekts. Sie bilden das Grundgerüst für den Prüfstand für die experimentellen Untersuchungen.

1.3 AP 3: Sicherheitsanalyse

1.3.1 Durchgeführte Arbeiten:

- Recherche zu Sicherheitsanforderungen in Hubgerüsten
- konstruktive Vorschläge zur Umsetzung relevanter Sicherheitsrestriktionen
- Vergleich mit Sicherheitsanforderungen in Aufzügen
- Vorschläge für redundante Systeme

1.3.2 Erzielte Ergebnisse:

Die Sicherheitsvorschriften in konventionellen Hubgerüsten sehen vor, dass die Senkgeschwindigkeit von 0,6 m/s nicht überschritten werden darf und dass es „im Falle des Versagens eines einzelnen zum Heben oder Senken benutzten Teils des Systems“ nicht zum unkontrollierten Absenken der angehobenen Last kommt (DIN EN ISO 3691-1). Die Senkgeschwindigkeit wird durch die Steuerung der Ventile des Hydraulikzylinders geregelt. Die Sicherheit gegen unkontrolliertes Absenken erfolgt durch Senkbremsventile.

In der Personenbeförderung müssen sicherheitsrelevante Bauteile redundant ausgeführt sein, z. B. Zugmittel, Betriebsbremse. Hubgerüste unterliegen nicht den einschlägigen

Kriterien der Personenbeförderung, sondern des Gütertransports. Darum unterliegen Ketten einer faktorbehafteten Auslegung und müssen redundant ausgeführt. Sie unterliegen, wie die Hydraulikschläuche auch, der regelmäßigen Wartung. Im Fall eines Kettenrisses wird das Risiko des unkontrollierten Absenkens in Kauf genommen.

Am Elektrohubgerüst sind Sicherheitsvorrichtungen wie Fangvorrichtungen, Federkraftbremsen, Klemmeinrichtungen für das Zugmittel oder Einrichtungen für das formschlüssige Arretieren der Hubrahmen ohne Redundanz untersucht worden. Diese sollen neben ihrer Sicherheitsfunktion auch das Halten der Last im Stillstand ermöglichen. Weniger aus Sicht der Sicherheit, aber aus Gründen der Energieeffizienz, wird ein geschlossenes Halten der Last bei Stromausfall bevorzugt, weil das Halten der Last häufiger im Betrieb von Hubgerüsten vorkommt, als die Hub- und Senkbewegungen.

Nach den Vorschriften des Güterverkehrs müssen im Vorzugskonzept für das Lasthalten durch eine Betriebsbremse im Antriebsmotor keine Sicherheiten gegen einen Defekt des Getriebes im Motor vorgesehen werden. Die Schubkette ist ähnlich wie bei konventionellen Hydraulikketten mit einem ausreichenden Faktor dimensioniert worden, sodass ein Bauteilversagen nicht durch Überlastung, sondern eher durch Verschleiß eintritt. Dieser Verschleiß ist durch regelmäßige Wartung abschätzbar.

1.3.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 3 mit dem Ziel

Das Ziel, die Sicherheit für das Konzept des elektrischen Hubgerüsts so gut wie möglich, aber auch so gut wie nötig einzuschätzen, wurde mit den Ergebnissen dieses Arbeitspunktes erreicht.

1.4 AP 4: Auswahl und Dimensionierung der Komponenten

1.4.1 Durchgeführte Arbeiten

- Dimensionierung der Antriebs- und Rekuperationseinheit
- Dimensionierung der Führung der Hubrahmen und des Gabelträgers
- Dimensionierung der Schubketten
- fertigungs- und beanspruchungsgerechte Gestaltung der Hubrahmen
- Gestaltung des Gabelträgers

1.4.2 Erzielte Ergebnisse

Das Motordrehmoment wird auf das Kettenritzel der Schubkette übertragen. Vergleichende Untersuchungen zeigten, dass ein Getriebemotor wirtschaftlicher und kompakter als ein getriebeloser Motor ist. In der größtmöglichen Belastung ist für den Antrieb ein Drehmoment von 1100 Nm erforderlich. Ein auf Basis von Arbeitsspielen dimensionierter Getriebemotor mit einer Leistung von 18 kW erzeugt ein Drehmoment von 1550 Nm. Für kurzzeitige Belastungsspitzen sind auch größere Drehmomente möglich. Die Bauteile für die Rekuperation wurden in Abhängigkeit der Leistung des Motors dimensioniert, denn je nach zurückgelegtem Weg beim Nutzsenken und der Leistung des Elektromotors ergibt sich die rekuperierbare Leistung. Der Frequenzumrichter muss in der Lage sein, diese Leistung in einem Zwischenkreis

kurzzeitig zu speichern, bevor sie an einen Wandler und Kondensator weitergeleitet wird. Wandler und Kondensator sind ebenso auf das System abgestimmt.

Die Führungsrollen sind entsprechend den zu erwartenden Kräften bei maximaler Belastung des Hubgerüsts dimensioniert.

Die Hubrahmen sind entgegen der ursprünglichen Planung nicht in Schubfeldträgerbauweise aufgebaut, sondern aus Gründen des Fertigungsaufwands in zusammenhängenden Biegeblechen. Die Hubrahmen weisen eine Dicke von 8 mm auf und sind damit ausreichend dimensioniert.

Die Schubkette ist nicht durch zwei kleine Schubketten aufgeteilt, sondern durch eine große, weil eine Schubkette weniger Kontaktflächen bietet als zwei kleine. Die Schubkette kann bis zu einer Masse von 3,5 Tonnen belastete werden, benötigt werden nur maximal 1,4 Tonnen.

1.4.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 4 mit dem Ziel

Das Ziel stimmt mit den Ergebnissen aus Arbeitspunkt 4 überein: Alle für den Prüfstand des elektrischen Hubgerüsts relevanten Bauteile wurden dimensioniert, eine Technische Dokumentation für die Fertigung wurde erstellt.

1.5 AP 5: Modellbildung

1.5.1 Durchgeführte Arbeiten

- Vereinfachung des Hubgerüstmodells
- Abgrenzung und Präzisierung
- statische und dynamische Analysen
- Auswertung der Analysen

1.5.2 Erzielte Ergebnisse

Aus dem CAD-Modell des favorisierten Konzeptes wurde ein vereinfachtes Modell erstellt und damit ein Ersatzmodell für das Finite-Elemente-Programm „Ansys Workbench“ erarbeitet. Dabei wurden einige Bauteile zusammengefasst und vereinfacht, beispielsweise sich stark verändernde Geometrien wie z. B. Gewinde, Schraubköpfe. Die statischen und dynamischen Analysen zur Verformung und Festigkeit der Bauteile des Hubgerüsts ergaben zulässige Verformungen und Bauteilspannungen unterhalb der Streckgrenze – die Sicherheit der Bauteile ist gewährleistet. Bei der Simulation wurden auch Lasten angenommen, die Extremfälle darstellen. Einer dieser Extremfälle sieht eine ungleichmäßige, maximale Belastung auf den Gabelzinken vor, bei gleichzeitiger maximaler Bremsverzögerung. Hier zeigt sich, dass der äußere Hubrahmen weniger beansprucht wird als der innere. Der äußere Hubrahmen könnte demnach dünner ausgeführt werden. Des Weiteren wurden einzelne Bauteile bzw. Teilsysteme separat untersucht, um die Genauigkeit der Vernetzung zu erhöhen. Beispielsweise wurde die Lagerung des Gabelträgers am äußeren Hubrahmen näher betrachtet, um den Einfluss von Querkräften zu untersuchen. Das Ergebnis zeigt, dass auch bei ungleichmäßiger

Belastung, die eine Querkraft erzeugt, eine axiale Sicherung durch eine Kombirolle genügt.

Die dynamische Simulation erfolgte mit dem Software-Tool Inventor Professional 2019. In dieser Simulation werden alle Körper als Starrkörper angenommen und mit Werkstoffparametern versehen. Die Darstellung der Schubkette galt als besondere Herausforderung. In der Realität besteht die Schubkette aus einzelnen Gliedern, wird durch das Zahnrad angetrieben und umgelenkt. Dabei besitzt jedes Glied viele Verrundungen, die auch alle mit den anderen Gliedern zueinander passen müssen. Beide Bedingungen führen zu einem sehr hohen Anspruch an die Vernetzung, was zu unakzeptablen Rechenzeiten führt. Um dem Nutzen der Simulation gerecht zu werden, wird die Schubkette im Modell gestreckt als komplette Einheit dargestellt. Dabei wurden die Versteifungen der einzelnen Kettenglieder sowie die Rollenkörper, welche den Kontakt zu den Rahmen herstellen, durch einzelne Segmente nachempfunden. In Abbildung 8 stehen sich das detaillierte CAD-Modell und das stark vereinfachte parametrische Simulationsmodell gegenüber. Des Weiteren ist die vereinfachte Schubkette im verformten Zustand unter maximaler Belastung von 16 kN dargestellt.

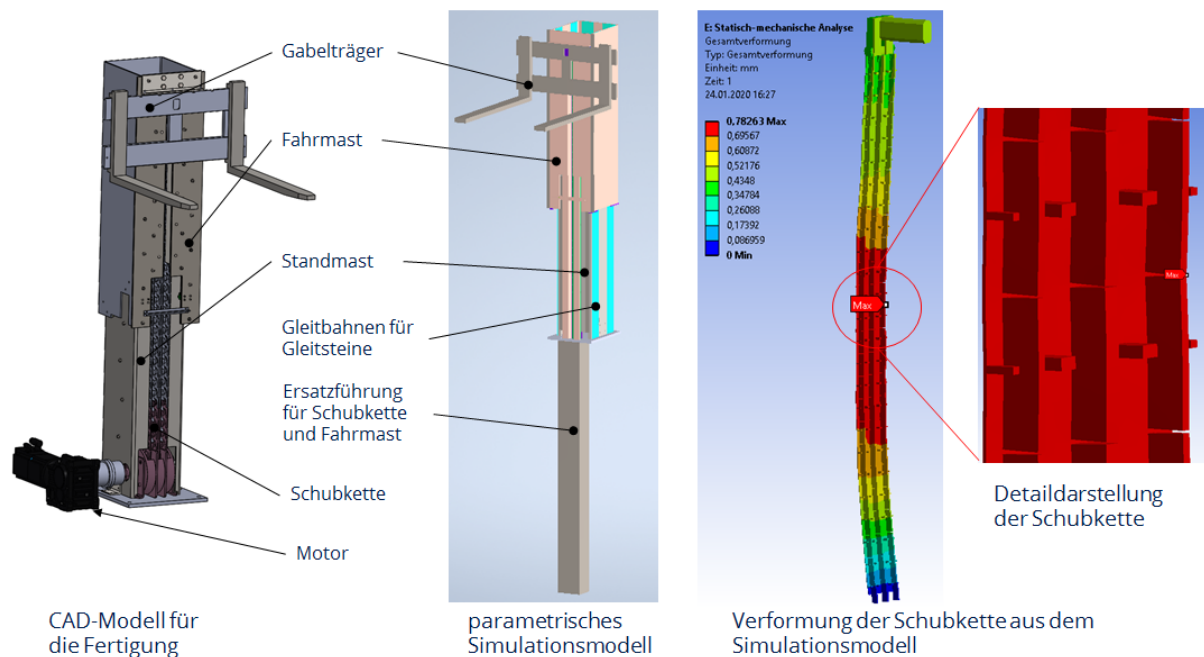


Abbildung 8: Vergleich CAD-Modell mit parametrischem Simulationsmodell

Die Schubkette wird sowohl am Standmast als auch am Fahrmast geführt. Um auch eine ausreichende Führung der gestreckten Schubkette im Simulationsmodell zu gewährleisten, wird dem Standmast noch eine Ersatzführung hinzugefügt. Im Simulationsmodell werden auf die Gabelzinken die Belastungen von 0 kg bis 1000 kg aufgebracht. Mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s wird ein Hubweg von 1,9 m realisiert. Die einstellbaren Parameter sind Steifigkeit, Dämpfung und Reibung. Diese wurden soweit angepasst, bis sie den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen optimal entsprachen. Als Reibwerte wurden für die Rollreibung 0,01, für die Gleitreibung 0,3 angegeben. Abbildung 9 zeigt den zeitlichen Verlauf des Hubwegs des

Simulationsmodells, Abbildung 10 die Verläufe der berechneten Antriebsenergien bei unterschiedlichen Nutzlasten mit und ohne Schubkette. Hier wird der Einfluss der Kette, speziell die Reibkontakte der Kettenrollen mit den Rahmen ersichtlich.



Abbildung 9: Hubweg aus der Simulation

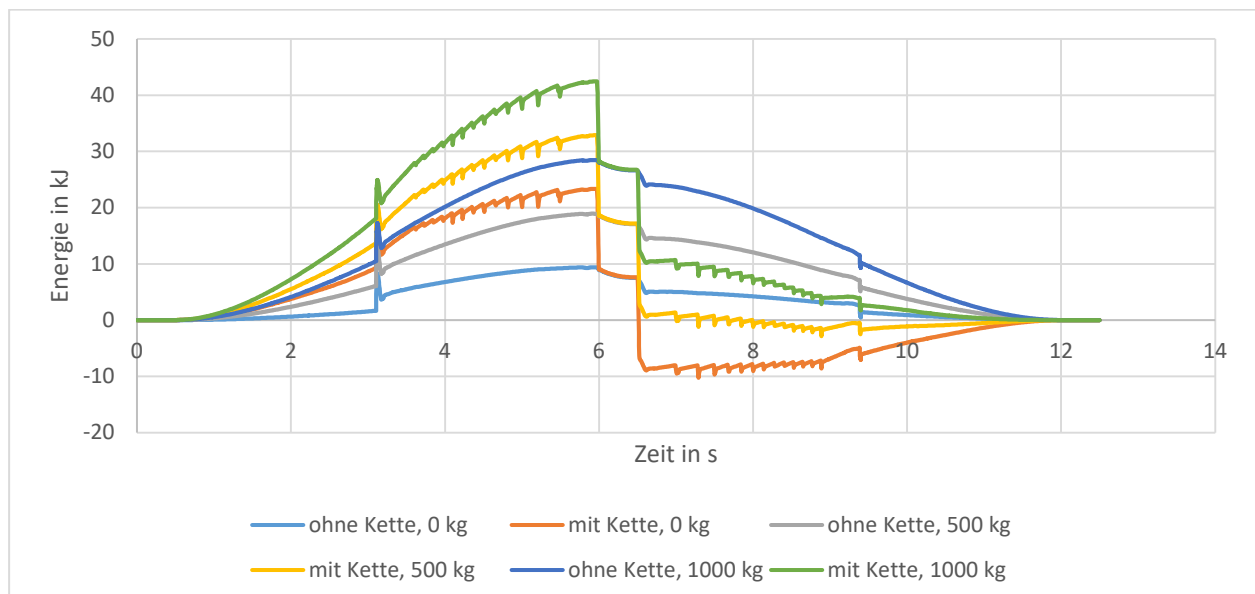


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Antriebsenergie mit und ohne Schubkette bei unterschiedlichen Nutzmasse, simuliert

Abbildung 10 zeigt, dass der Einfluss der Schubkette auf die Antriebsenergie mit zunehmender Nutzmasse größer wird. Er beträgt bei 0 kg 39,4 % der Antriebsenergie, bei 500 kg 56,5 % und bei 1000 kg 66,9 %. Die Gegenüberstellung des Ketteneinflusses ist deswegen von Bedeutung, da die Kontaktflächen der Kette nicht so klein gestaltet werden können, wie sie im Realfall wären, weil sonst keine Konvergenz des Kontaktes gefunden werden würde und somit keine Berechnung möglich ist. Im Realfall berühren die Rollen der Kette tangential die Führung der Rahmen, wodurch sich eine Linienlast ergibt. In der Simulation wurden diese Rollen durch Quader mit rechteckigen Kontaktflächen modelliert, wodurch der große Einfluss resultiert. Daher wird der Realfall zwischen den

Werten mit und ohne Schubkette gesehen. Warum in Abbildung 10 beim Senkvorgang Antriebsenergien größer 0 kJ dargestellt werden, ist nicht nachvollziehbar.

Werden die berechneten Antriebsenergien beim Hubvorgang von Abbildung 10 mit den experimentellen Ergebnissen aus Abbildung 14 verglichen, so ergibt sich für die Nutzmasse von 0 kg eine 99 %-ige Übereinstimmung für den Versuch ohne Einfluss der Kette. Mit Einfluss der Kette beträgt die Abweichung knapp 40 %. Ähnlich verhält es sich mit dem Vergleich bei der Nutzmasse von 500 kg, nur dass die Abweichung maximal 37,5 % beim Einfluss mit Kette ist. Bei einer Nutzmasse von 1000 kg beträgt die Abweichung mit Einfluss der Kette ca. 28 %, ohne Kette gibt es eine Abweichung von 6,4 %. Insgesamt gibt das Simulationsmodell die Realität gut wieder.

1.5.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 5 mit dem Ziel

Im Ergebnis wurde ein dynamisches, parametrisches Simulationsmodell erstellt, was mit den Antriebsenergien aus den experimentellen Untersuchungen validiert wurde. Durch die Geometrie der Schubkette ergibt sich in den Ergebnissen der Simulation von vornherein ein breiter Toleranzbereich von bis zu 41 %. Die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen liegen in diesen Bereichen. Die Abweichungen nehmen mit zunehmender Nutzmasse ab. Das Ergebnis stimmt mit dem Ziel überein.

1.6 AP 6: Experimentelle Untersuchungen

1.6.1 Durchgeführte Arbeiten

- Fertigung und Montage des Prüfstands
- Durchführung und Auswertung der Untersuchungen zur Energieeffizienz

1.6.2 Erzielte Ergebnisse

Am Prüfstand für das Elektrohubgerüst wurden Messungen mit Nutzmassen in 100 kg-Schritten bis zu einer Tonne mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Für jede festgelegte Geschwindigkeit sowie für jede Nutzmasse wurden je 5 Messungen absolviert. Die Messwerte liegen dabei eng beieinander. Die größte Standardabweichung liegt bei 0,1 kJ, die geringste bei 0,008 kJ. Als Massen wurden Normgewichte aus Stahl verwendet. Die zurückgeführte Energie wurde einem Bremswiderstand zugeführt. Für den Prüfstand waren im Berichtszeitraum auch Versuche mit einem Kondensator, der die Rekuperation wirklichkeitsnah nachbildet, vorgesehen. Aufgrund technischer Probleme konnten diese Messungen bisher nicht durchgeführt werden. Abbildung 11 zeigt den schematischen Steuerungsablauf. Darin sind die beiden Messstellen für die Leistung gekennzeichnet: P_{Wirk} beschreibt die Wirkleistung des Antriebsmotors, P_{Brems} stellt die Bremsleistung vor dem Bremswiderstand dar. Der Hubweg bzw. Senkweg wird über einen Lasersensor erfasst. Die Abtastrate für die Messungen beträgt 19231 Hz.

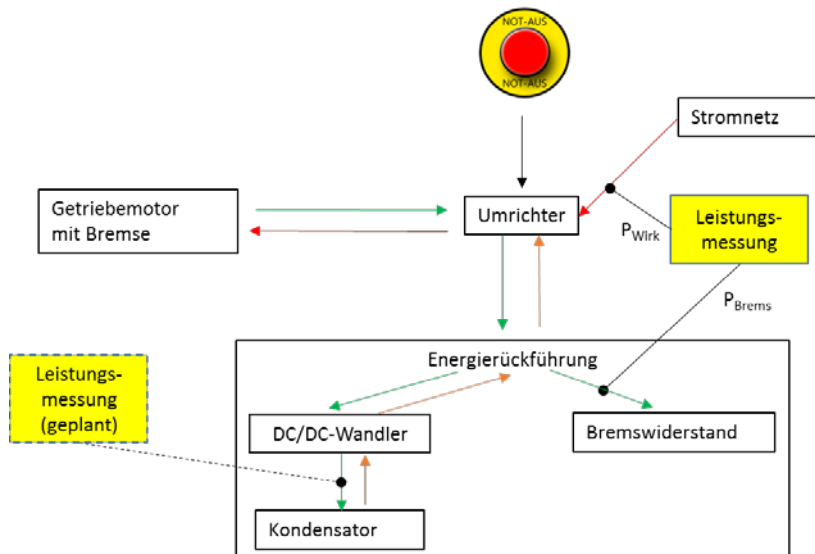


Abbildung 11: Schematischer Ablauf der Steuerung für den Hubgerüst-Prüfstand

Abbildung 12 zeigt den Hubgerüst-Prüfstand mit maximaler Beladung.



Abbildung 12: Hubgerüst-Prüfstand in Vorder- und Seitenansicht mit 1000 kg Nutzmasse

In den Versuchen wurde ein Einlagerungsvorgang in die Steuerung programmiert, sodass der Prüfstand auf 1,85 m ausfährt, eine kurze Senk- und Hubbewegung von 30 cm absolviert und danach komplett einfährt. Abbildung 13 zeigt exemplarisch für ein Arbeitsspiel die Messwerte für den Hubweg und die Bremsleistung. Die eingezeichneten Flächen unter der Leistung beschreiben die daraus berechneten Energiewerte.

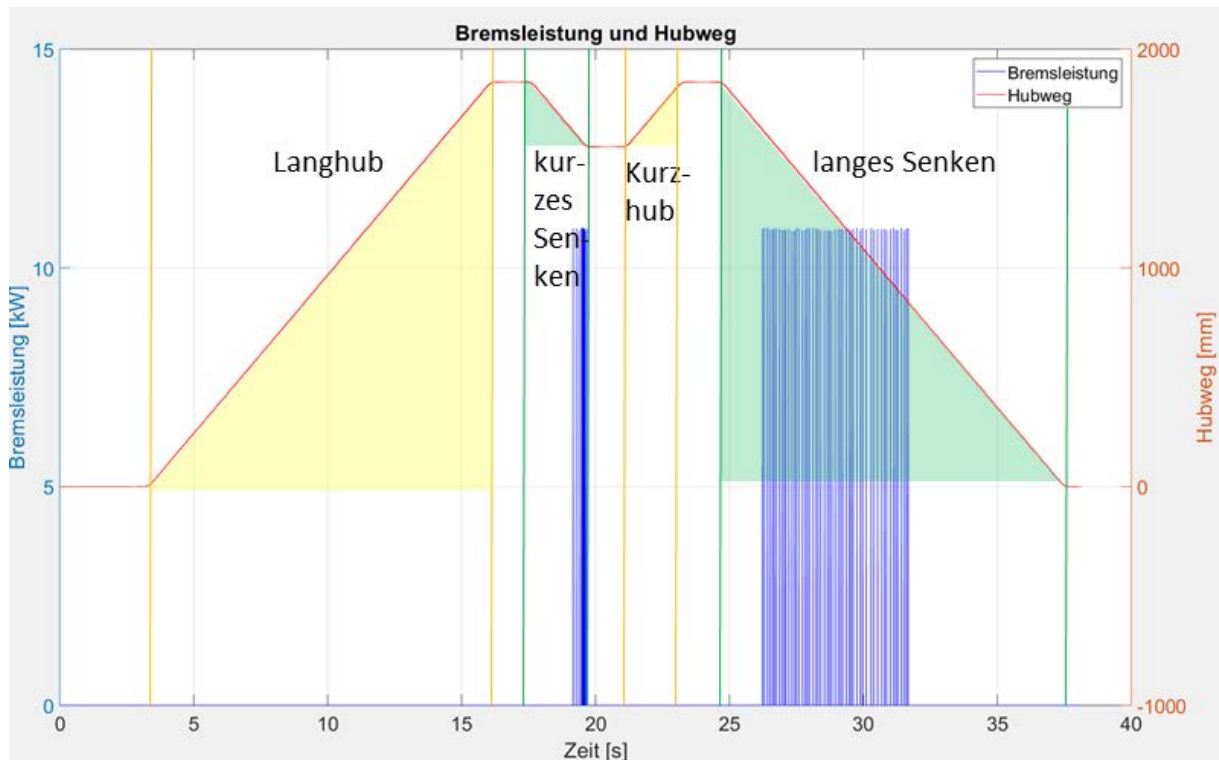


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf von Bremsleistung und Hubweg, gemessen bei einer Nutzmasse von 400 kg

Abbildung 14 zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Energien bei Messungen mit verschiedenen Nutzmassen und Geschwindigkeiten beim kurzen Senken bzw. Kurzhub, was sich auf den kleinen Einlagerungsvorgang aus Abbildung 13 bezieht. Abbildung 15 zeigt diese Werte für die langen Hub- und Senkvorgänge.

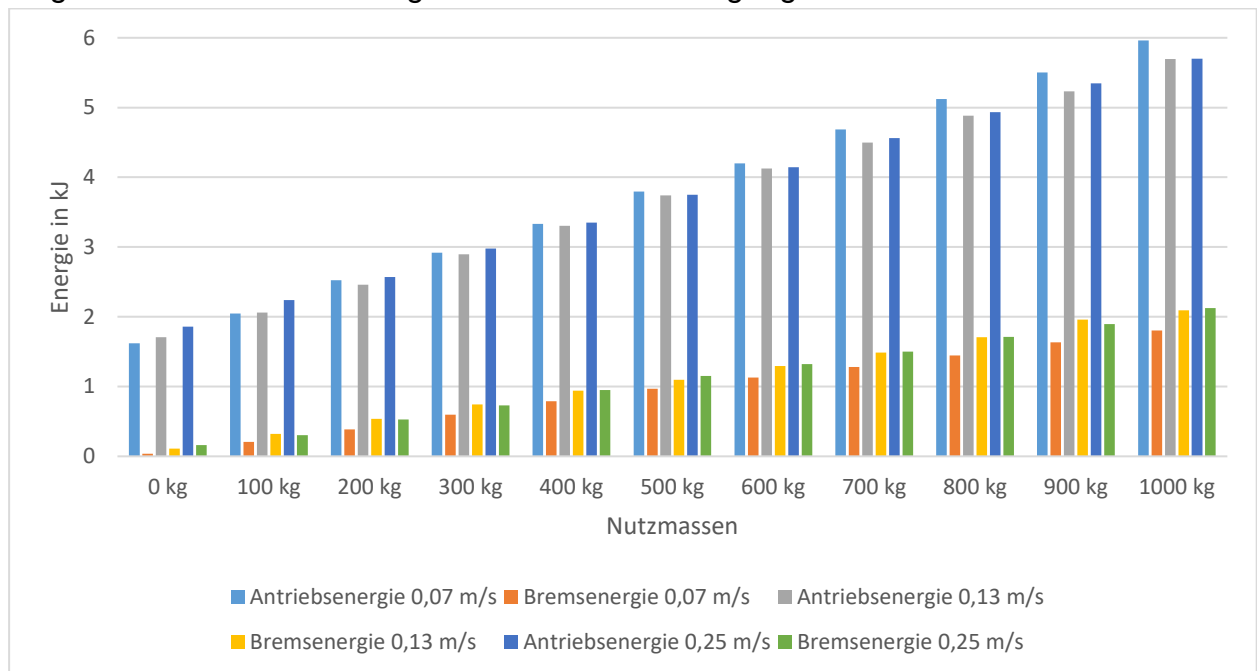


Abbildung 14: Antriebs- und Bremsenergien für die kurzen Senk- und Hubvorgänge mit verschiedenen Nutzmassen und Geschwindigkeiten

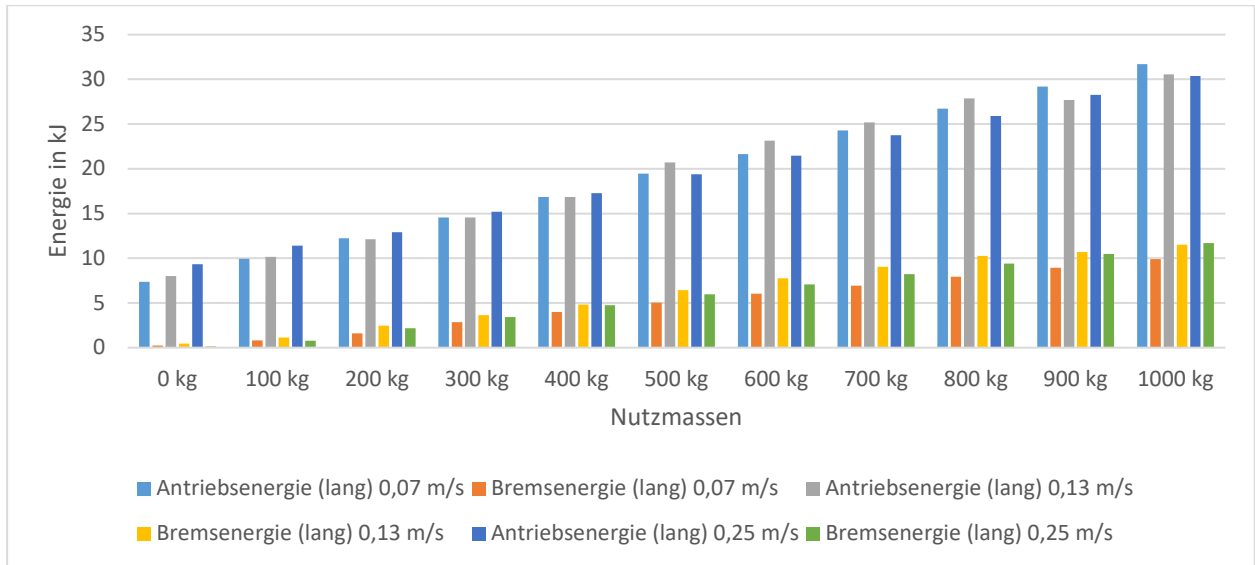


Abbildung 15: Antriebs- und Bremsenergien für die langen Senk- und Hubvorgänge mit verschiedenen Nutzmassen und Geschwindigkeiten

Abbildung 16 zeigt den auf ein Arbeitsspiel bezogenen Anteil der Bremsenergie bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und mit verschiedenen Nutzmassen für den Langhub bzw. das lange Senken, Abbildung 17 für den Kurzhub bzw. das kurze Senken.

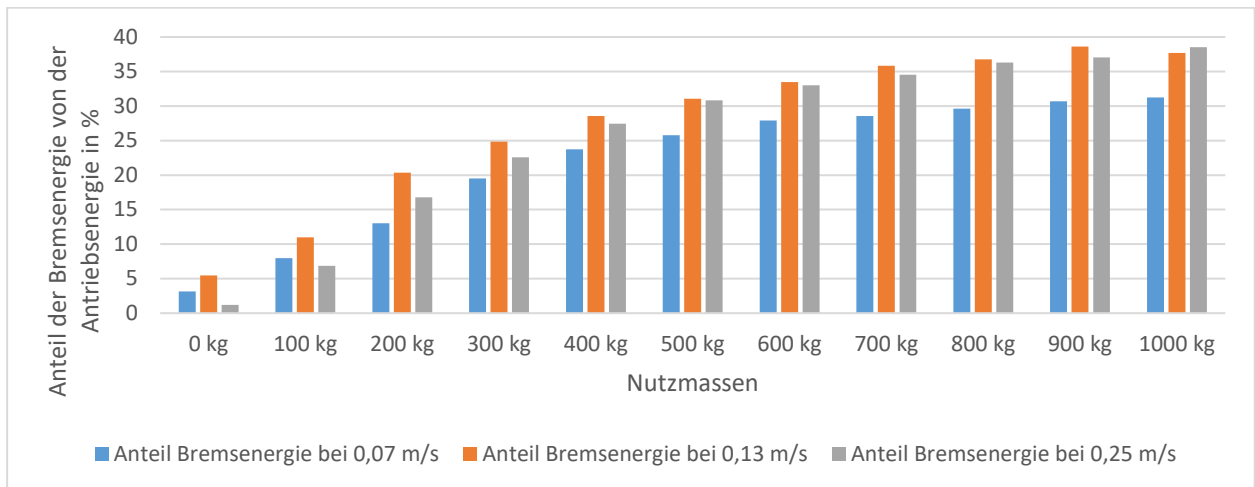


Abbildung 16: Anteil der Bremsenergie von der Antriebsenergie beim Langhub bzw. langes Senken

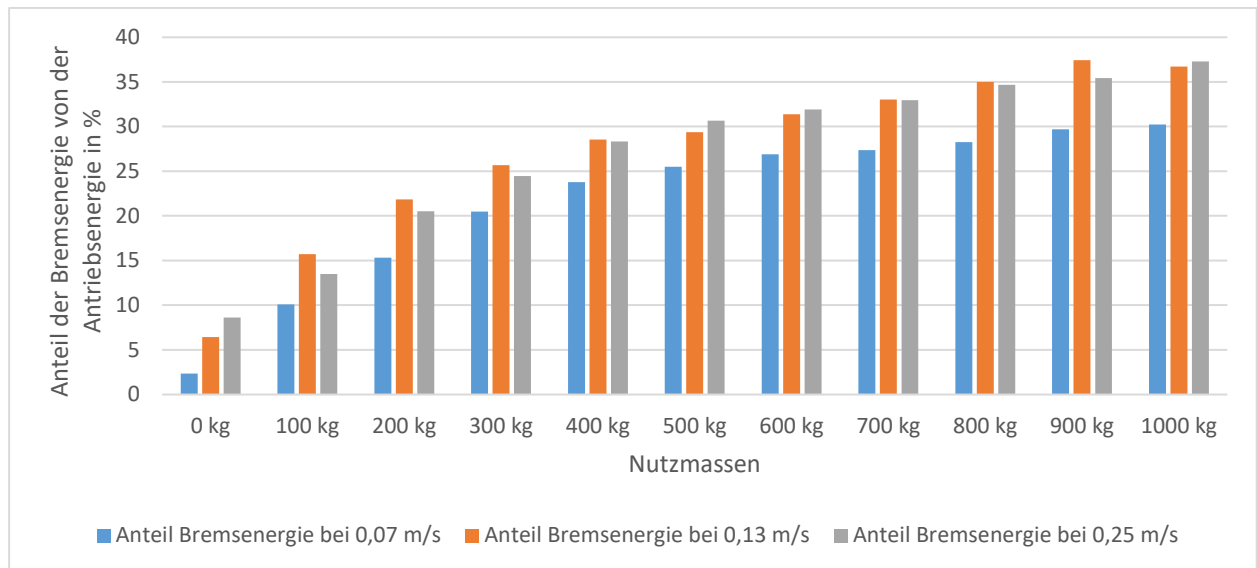


Abbildung 17: Anteil der Bremsenergie von der Antriebsenergie beim Kurzhub bzw. kurzes Senken

Die entsprechenden Verläufe aus Abbildung 16 und 17 lassen einen degressiven Verlauf erkennen. Mithilfe von Matlab und der „Curve Fitting Toolbox“ lassen sich Polynome mit dem Ansatz $y = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4$ ermitteln, die einen kontinuierlichen Verlauf der Nutzmasse gegenüber dem Anteil der Bremsenergie erlauben. Diese Polynome sind für alle Geschwindigkeiten sowie den Kurz- und Langhüben in Abbildung 18 dargestellt.

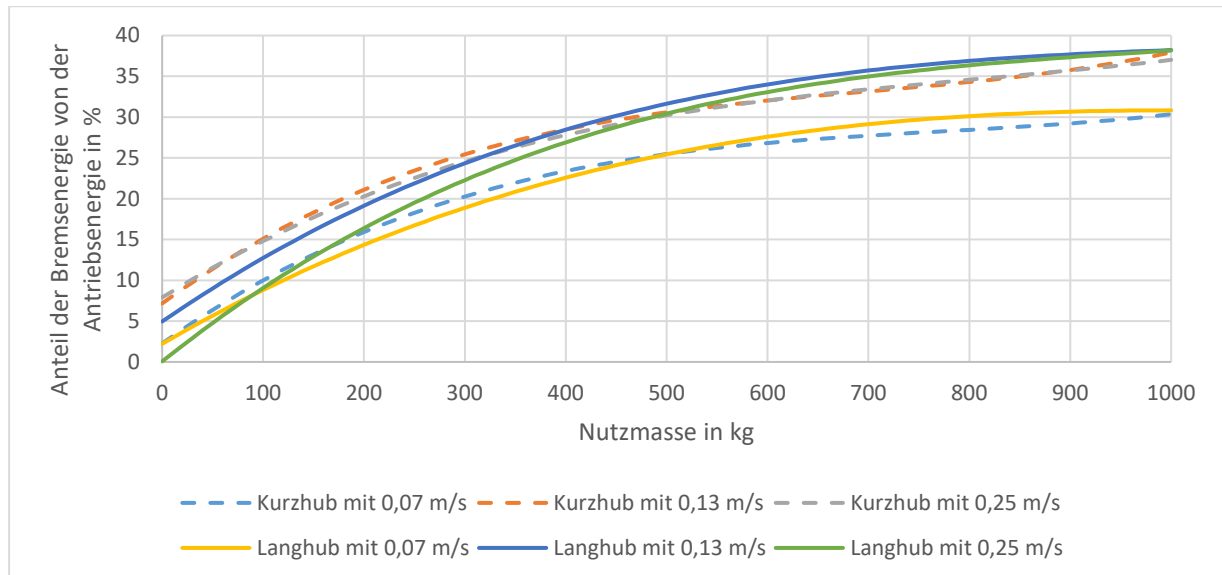


Abbildung 18: Polynome 3. Grades der Anteile der Bremsenergie von der Antriebsenergie bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Nutzmassen

Werden die Geschwindigkeiten zu den jeweiligen Hubspielen zugeordnet, zeigt sich, dass im Nutzmassenbereich von 400 kg bis 500 kg die Kurve des Kurzhubes mit der des Langhubes sich schneiden. Daraus wird geschlussfolgert, dass bis zum Schnittpunkt kurze Hub- und Senkvorgänge effizienter sind als lange. Nach dem Schnittpunkt ist es

umgekehrt. Diese Erkenntnis wird in Abbildung 19 für 0,07 m/s, in Abbildung 20 für 0,13 m/s und in Abbildung 21 für 0,25 m/s beschrieben.

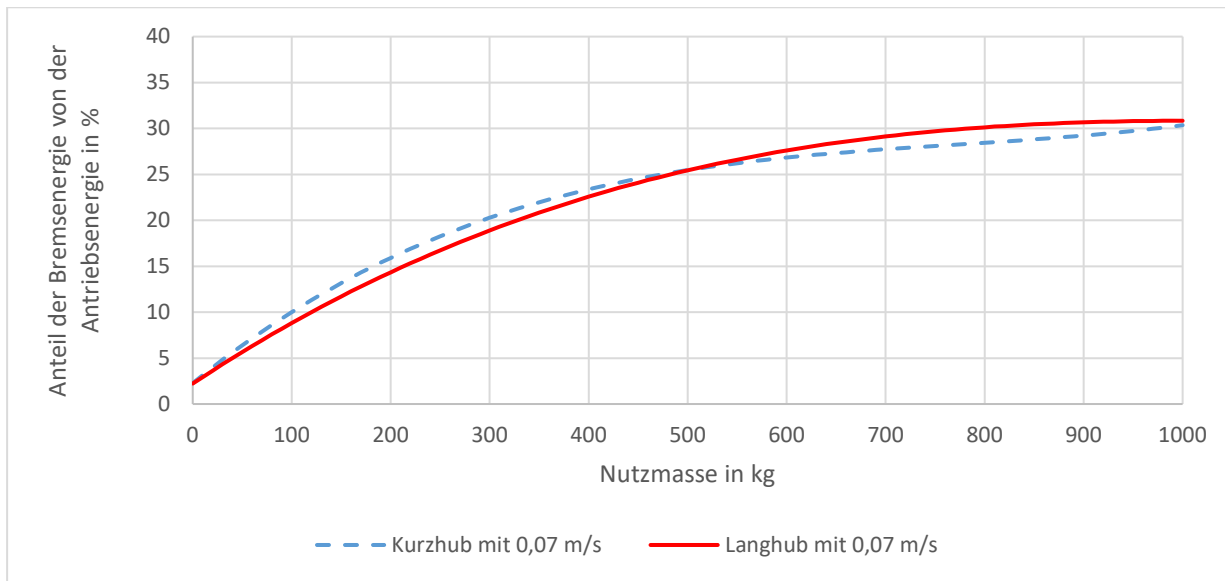


Abbildung 19: Vergleich des Anteils der Bremsenergie bei einer Geschwindigkeit von 0,07 m/s; Schnittpunkt der Kurven bei 500 kg

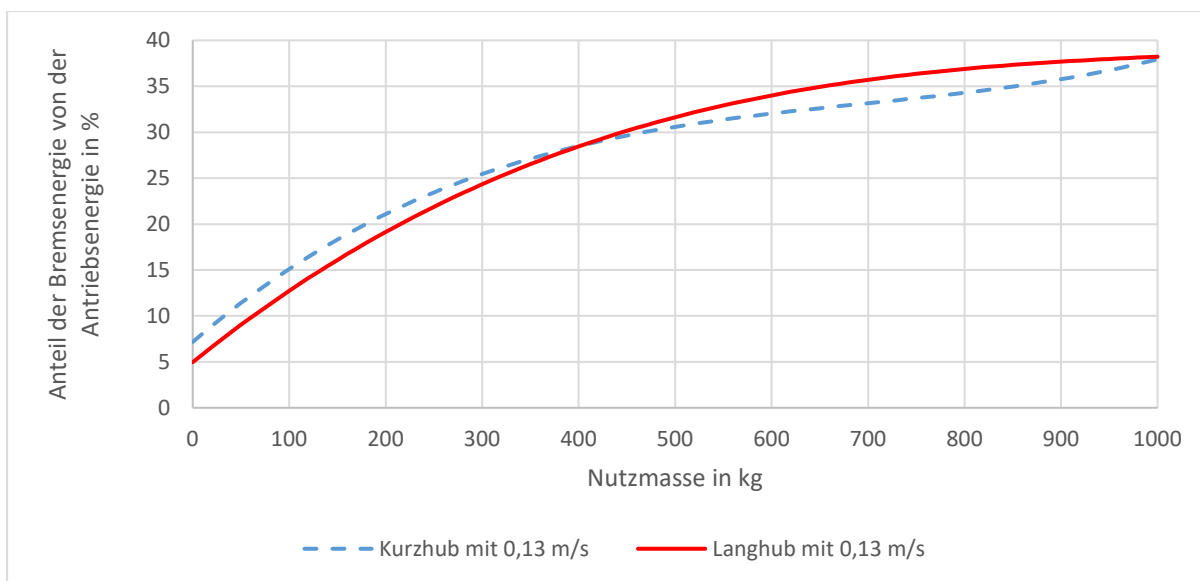


Abbildung 20: Vergleich des Anteils der Bremsenergie bei einer Geschwindigkeit von 0,13 m/s; Schnittpunkt der Kurven bei 400 kg

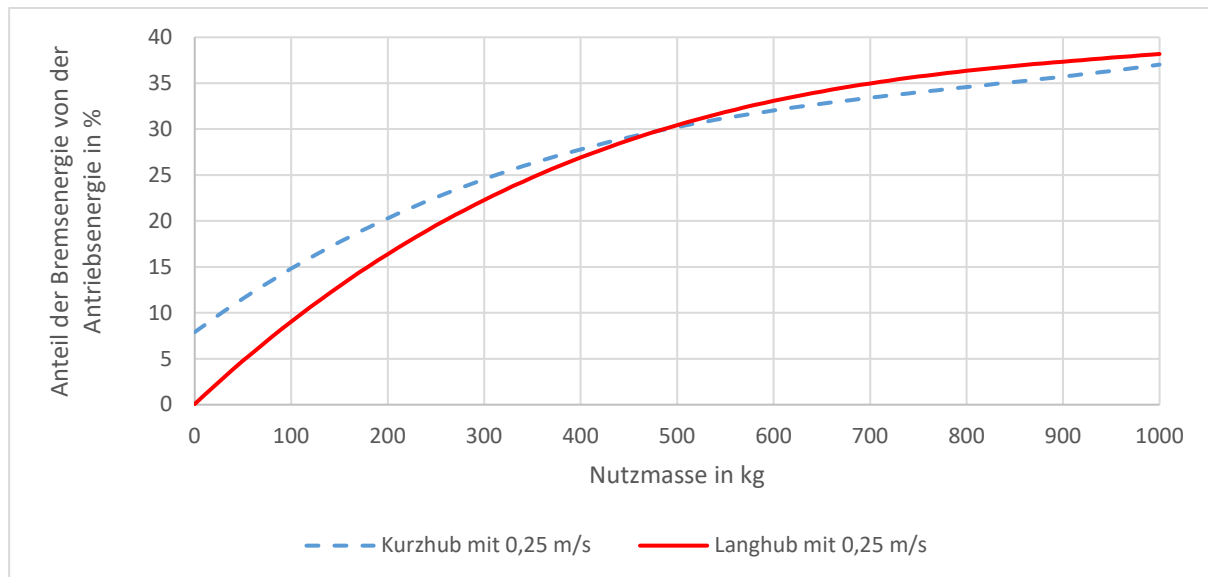


Abbildung 21: Vergleich des Anteils der Bremsenergie bei einer Geschwindigkeit von 0,25 m/s; Schnittpunkt der Kurven bei 500 kg

In den Untersuchungen zeigte sich, dass die Energieeffizienz neben der Geschwindigkeit und der Nutzmasse auch von der Position der Nutzmasse auf dem Gabelträger abhängt. Ein größerer Abstand zum Gabelträger bewirkt ein größeres Biegemoment auf die Gleitlager, wodurch sich die Reibung erhöht und die Energieeffizienz gemindert wird. Die bisher aufgeführten Ergebnisse basieren auf den Versuchsaufbauten nach Abbildung 12, wo die Nutzmasse so nah wie möglich an den Gabelträger gelegt ist. Abbildung 22 hingegen zeigt eine Nutzmasse, die so weit entfernt wie möglich vom Gabelträger ist. Der Abstand von 350 mm verursacht eine stärkere Wirkung des Polygoneffekts seitens des Schubkettenantriebes, was zu sehr starken Schwingungen führte. Daher wurden diese Versuche nur bis 500 kg bei mittlerer Geschwindigkeit von 0,13 m/s durchgeführt. Bei der Nutzmasse von 400 kg zeigte sich die größte Verringerung der Energieeffizienz um den Faktor 1,26 für die kurzen Hub- und Senkvorgänge, für die langen Hub- und Senkvorgänge ist es 1,25. Obwohl es bei 500 kg zu einem größeren Reibmoment kommen dürfte, fällt bei dieser Nutzmasse der Unterschied geringer aus. Möglicherweise liegt das am veränderten Schwingungsverhalten gegenüber der Nutzmasse von 400 kg, was ein besseres Gleiten der Gleitsteine ermöglicht.

Der Polygoneffekt lässt sich zum einen durch eine entsprechende Regelung des Antriebsmotors minimieren, zum anderen durch eine 180° Umschlingung direkt am Antriebsritzel. Dadurch sind mehr Zähne im Eingriff, was bei einer Teilung von 60 mm einen großen Unterschied bewirkt.

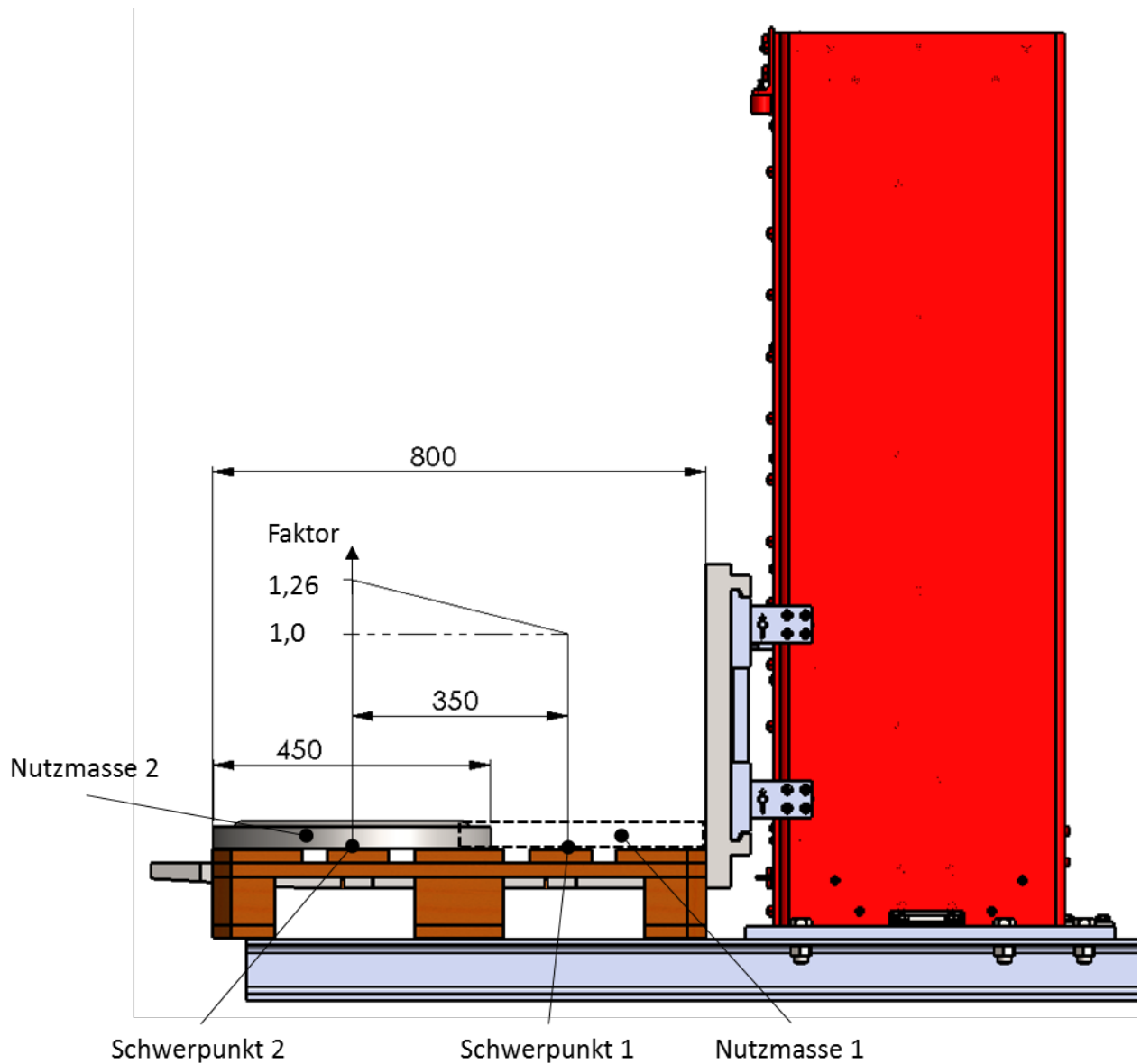


Abbildung 22: Schema der Nutzmassenverteilung auf dem Gabelträger

Tabelle 2 beinhaltet die Werte zum Einfluss der Position der Nutzmasse auf die Energieeffizienz. Die Bezeichnungen beziehen sich auf das Schema in Abbildung 22.

Tabelle 2: Einfluss der Position der Nutzmasse auf die Energieeffizienz

Nutzmasse	Anteil Langhub in %		Anteil Kurzhub in %		Faktor Langhub	Faktor Kurzhub
	Nutzmasse 1	Nutzmasse 2	Nutzmasse 1	Nutzmasse 2		
0 kg	5,490	5,490	6,417	6,417	1	1
100 kg	11,007	10,330	15,733	14,507	1,066	1,085
200 kg	20,351	17,946	21,844	18,607	1,134	1,174
300 kg	24,870	20,673	25,682	21,146	1,203	1,215
400 kg	29,289	23,512	28,982	23,064	1,246	1,257
500 kg	31,066	26,942	29,358	23,749	1,153	1,236

1.6.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 6 mit dem Ziel

Der Arbeitspunkt 6 liefert umfangreiche Ergebnisse zur Energieeffizienz des Hubgerüst-Konzeptes, welche das Ziel vollständig erfüllen.

1.7 AP 7: Zusammenfassung der Ergebnisse

1.7.1 Durchgeführte Arbeiten

- technische Vergleiche
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

1.7.2 Erzielte Ergebnisse

Laut dem Hersteller für Schubketten, Heinrich Wolf GmbH & Co. KG, finden Schubketten in folgenden Anwendungen statt:

- PKW-Lift (Stellplatzanhebung),
- Teleskoplift für die Betankung von Flugzeugen,
- Höhenverstellung einer Überladebühne zur Beladung von LKWs mit Staplern oder Hubwagen,
- Klappenantriebe zur Betätigung von Dachluken, Feuerklappen und ähnlichem,
- Containerumschlag z. B. von LKW zu LKW,
- Ausschubcontainer,
- Ofenbeschickung,
- Chargenhandling,
- Theaterbühnen.

Für all diese Anwendungen könnten ebenso hydraulische Aktuatoren verwendet werden. Nachteilig an hydraulischen Anlagen sind beispielsweise die höhere Entzündungsgefahr, was eine Anwendung in der Ofenbeschickung risikobehafteter gestaltet. In Aufzügen, insbesondere Personenaufzügen, können Hydraulikzylinder nicht ständig ruhend unter Druck stehen, sondern sie werden nach einer entsprechenden Zeit abgesenkt, was die Anwendung in angehobenen PKW-Stellplätzen nur durch zusätzliche Sicherheitseinrichtungen ermöglicht. Hydraulikaggregate arbeiten zudem sehr geräuschintensiv, wodurch die Anwendung in Theaterbühnen zusätzliche Maßnahmen zur Schallemission hervorrufen. Hydrauliköl ist komprimierbar, was zwar durch die Aggregate nachreguliert werden kann, jedoch wird das unter Zeitverzug realisiert. Schubketten sind nicht komprimierbar. Sie liefern stets eine genaue Positionierung. Des Weiteren sind Hydraulikzylinder durch Kolbenstange und Zylinderrohr gestalterisch fixiert. Schubketten ermöglichen eine komprimierte Speicherung der Kette durch Kettenumlenkungen bei großer Kettenlänge, was den Einsatz dieser Systeme flexibler gestaltet.

Jedoch besitzt die Hydraulik eine bisher unerreichte Leistungsdichte, wodurch alternative Konstruktionen voluminöser ausfallen. Das Konzept des Flurförderzeug-Hubgerüsts würde unter hydraulischem Betrieb ca. 40 % kompakter ausfallen. Die

Anschaffungskosten für das hydraulische System sind 20 % gegenüber der Einzelanfertigung des elektrischen Hubgerüsts mit Schubkette. Des Weiteren wird der Verschleiß der Schubkette größer als beim hydraulischen System eingeschätzt, was die Lebensdauer mindert. Diese Schätzung basiert auf dem allgemeinen Verhalten von Ketten gegenüber den bewährten Erfahrungen der Hydraulik.

Schubketten können sehr schnelle und genaue Positionierungen erzielen. Ihre Geschwindigkeit geht zum Teil über 1 m/min hinaus. Hydraulische Anlagen laufen in der Regel etwas unter dieser Geschwindigkeit, wodurch die Umschlagleistung bei Systemen mit Schubkette etwas höher sein dürfte.

Ferner erzielen hydraulische Hubgerüste unter idealen Bedingungen – Betriebstemperatur, Viskosität des Öls – ein Nutzsinken von ca. 40 %. Allerdings arbeiten Systeme mit Schubketten unabhängig dieser „idealen“ Bedingungen und liefern ein stetes zuverlässiges Ergebnis, was auch in den geringen Standardabweichungen der durchgeführten Versuche zu erkennen ist. Das Elektrohubgerüst erzielte eine maximale Rekuperation in den Bremswiderstand von 38,6 % bei 900 kg. Es ist davon auszugehen, dass eine Rekuperation in einen Kondensator in etwa den Maximalwert der hydraulischen Hubgerüste erreicht.

Tabelle 3 fasst den Vergleich des hydraulischen und des elektrischen Hubgerüsts durch eine Normierung der Wertepaare zusammen.

Tabelle 3: Normierte Gegenüberstellung des hydraulischen und des umgesetzten elektrischen Hubgerüsts

	Hydraulische System	elektrisches Hubgerüst mit Schubkette
Baugröße	1	1,5
Anschaffungskosten	1	4
Lebensdauer	1,5	1
Umschlagleistung	1	1,2
Rekuperation	1	1
Einsparung	2,3	1

Bei der Gegenüberstellung ist zu beachten, dass die Hydraulik ein bewährtes und marktgängiges System ist. Das umgesetzte Konzept für ein elektrisches Flurförderzeug-Hubgerüst ist eine Sonderanfertigung, wodurch die Anschaffungskosten von vornherein wesentlich höher sind. Eine Serienfertigung der Schubkette würde die Anschaffungskosten reduzieren. Des Weiteren besitzen Schubketten sehr viele Bauteile, die von Hand montiert werden. Eine Verbesserung der Schubkette in Bezug auf eine kostengünstigere Fertigung, ließe die Anschaffungskosten weiter minimieren, z. B. Substitution der Hälfte der Seeger-Ringe durch Wellenabsätze, Ersetzen der Wälzlager durch Gleitlager. Damit würde die Schubkette schätzungsweise 50 % günstiger werden, wodurch sie aber immer noch über dem Anschaffungspreis eines hydraulischen Systems liegt. Ferner werden Verbesserungen in der Effizienz des elektrischen Hubgerüsts

gesehen. Durch den Einsatz von Wälzlagern anstatt der verwendeten Gleitlager zwischen den Hubrahmen kann die Reibung erheblich reduziert werden, was den Effekt der Reibungsbeeinflussung durch die Schwerpunktlage der Nutzmasse zu den Hubrahmen vermindert. Dadurch können ca. weitere 5 % Energie eingespart werden.

1.7.3 Einschätzung der Ergebnisse aus AP 7 mit dem Ziel

Die Ergebnisse aus dem Arbeitspunkt 7, technische und wirtschaftliche Vergleiche zwischen dem elektrischen Hubgerüstkonzept mit Schubkette und den hydraulisch betriebenen Hubgerüsten, stimmt mit dem Ziel überein.

2 Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben

- Im Berichtszeitraum wurden zur Durchführung der Arbeiten 24 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt.
- Es wurden sechs Studentische Hilfskräfte in die Bearbeitung mit einbezogen und eine Seminararbeit sowie eine Abschlussarbeit verfasst, wobei eine weitere noch aussteht.
- Es wurde ein Gerät (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) gemäß Projektplan angeschafft: 1 Stück Hubgerüstprüfstand in Höhe von 48.998,25 €. Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) wurden keine Ausgaben geplant und keine durchgeführt.

3 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der Planung sowie der Inhalte der formulierten Arbeitspakete im Projektantrag entsprachen. Die Ergebnisse des Projektes entsprechen den Erwartungen des Arbeitsablaufs. Zum Erreichen der Zielstellung wurden Mitarbeiter laut Plan beschäftigt.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

In vielen technischen Bereichen wird derzeit nach Konzepten für emissionsfreie und saubere Anlagen gesucht. Die Idee, ein elektrisches Hubgerüst mit Schubkette zu betreiben, besteht bereits seit 2012. Eine Umsetzung erfolgte bisher nicht. Die Ergebnisse sind darum von großer wissenschaftlicher Bedeutung, weil sie Grundlagenforschung auf dem Gebiet elektrifizierter Hubgerüste sind. Das Konzept für ein elektrisches Flurförderzeug-Hubgerüst zeigt die Funktionsfähigkeit dieses Systems, das aus technischer Sicht wettbewerbsfähig mit hydraulischen Anlagen ist. Es zeigt aber

auch das Verbesserungspotential für weiterführende Arbeiten, um elektrische Hubgerüste effizienter sowie wirtschaftlicher zu gestalten.

Damit dieses Konzept für ein elektrisches Hubgerüst in Flurförderzeugen für Unternehmen attraktiv umgesetzt werden kann, bedarf es einer kostengünstigeren Schubkette. Die Serienproduktion der Schubkette sowie eine wirtschaftlichere Fertigung verringern die Anschaffungspreise, die derzeit bei etwa dem 5-fachen gegenüber der Hydraulik liegen. In Industriebereichen in denen ein besonderer Reinheitsanspruch herrscht, z. B. in der Pharmazie oder in der Lebensmittelindustrie, kann dieses Konzept des Hubgerüsts bereits jetzt schon attraktiv sein. Eine Kontaminierung reiner Erzeugnisse durch die Leckage hydraulischer Hubgerüste verursachen hohe Kosten für Reinigung bzw. Entsorgung bereits hergestellter Produkte, was mit den höheren Anschaffungskosten für das elektrische Hubgerüst gegengerechnet werden muss.

5 Plan zum Ergebnistransfer aller im Projektzeitraum durchgeführten und geplanten Transfermaßnahmen

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der intensive Kontakt mit Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses gepflegt. In den Projektsitzungen wurde angeregt der Bearbeitungsstand sowie die künftigen Schritte abgestimmt. Die Ergebnisse wurden in Hebezeuge Fördermittel – Technische Logistik“ der Huss-Medien GmbH, im Logistics Journal veröffentlicht sowie auf Tagungen wie der 1. Symposium Flurförderzeuge, der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) sowie auf der XXIII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics präsentiert. Des Weiteren erfolgte die Wissensvermittlung in Forschung und Lehre, z. B. im Rahmen der Vorlesungsreihe „Analytische Verfahren – Hubmastanalyse“. Daraus entstanden eine Studienarbeit sowie eine Abschlussarbeit, wobei eine Abschlussarbeit derzeit noch nicht beendet ist.

Tabelle 4 führt alle im Antrag geplanten Transfermaßnahmen auf.

Tabelle 4: Alle im Antrag geplanten Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Information des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	- Abstimmung Arbeitsstand und Vorgehensweise - regelmäßiger, ausführlicher Ergebnistransfer	Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	<u>Durchgeführt:</u> PA- Sitzungen am 17.10.2017, 19.03.2018, 08.01.2019, 03.02.2020
Ansprache weiterer Unternehmen außerhalb des PA	- weitere Verbreitung der Technologie in der Wirtschaft, besonders der Intralogistik -	a) Präsentation der Ergebnisse auf Tagungen / Veranstaltungen der Forschungsstelle Fachtagungen des VDI	<u>Geplant:</u> a) Haupt- und Schlussphase b) nach Bedarf im gesamten Zeitraum

	<p>Einbindung interessierter Unternehmen, FV und Verbände (VDI, DSV)</p> <p>- direkter Transfer in die Industrie</p>	<p>b) individuelle Ansprachen</p>	
<p>Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre</p>	<p>- Verbreitung der Ergebnisse in Forschung und Lehre</p> <p>- Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten</p>	<p>Lehrveranstaltungen und Forschungsseminare (z. B. Technische Logistik) an der Fst., Einbindung von studentischen Hilfskräften</p>	<p><u>Durchgeführt:</u> Übernahme der Ergebnisse in die Lehre</p> <p><u>Geplant:</u> fortlaufend</p>
<p>wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften / Dissertationen</p>	<p>a) Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen</p> <p>b) Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten</p>	<p>a) Veröffentlichungen in Fachzeitschriften</p> <p>b) Studien-, Diplomarbeiten und ggf. eine Dissertation</p>	<p><u>Durchgeführt:</u></p> <p>a) Forschungskatalog in „Hebezeuge Fördermittel – Technische Logistik“ der Huss-Medien GmbH</p> <p>a) Veröffentlichung im Logistics Journal</p> <p>b) Studienarbeit: „Konstruktive Gestaltung von Hubrahmen für elektrische Hubgerüste</p> <p>b) Diplomarbeit „Dynamische Simulation eines Hubgerüsts für elektrische Antriebe“</p> <p><u>Geplant:</u></p> <p>a) in der Schlussphase</p> <p>b) mit Beginn des Vorhabens</p>
<p>Einbeziehung von Multiplikatoren</p>	<p>Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Know-how-Transfer, Stärkung des Forschungsstandortes Deutschland, speziell Sachsen</p>	<p>- Forschungsprogramme „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)</p> <p>- Verbundprojektförderung auf dem Gebiet der Zukunftstechnologien im Freistaat Sachsen</p>	<p><u>Geplant:</u> fortlaufend</p>

<p>Vorstellung der Ergebnisse / Vorträge und Präsentationen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - nationaler und internationaler Ergebnistransfer - Information der Mitglieder der FV sowie interessierter Fachleute 	<ul style="list-style-type: none"> - Posterbeitrag im Rahmen des 15. Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) inklusive eines Artikels im Tagungsband - Präsentation und Tagungsband des "XXII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics" 	<p><u>Durchgeführt:</u> 1. Symposiums Flurförderzeuge am 19.09.2018</p> <p>15. Fachkolloquium der WGTL am 11.09.2019 bis 12.09.2019</p> <p>XXIII International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics vom 18.09.2019 bis 20.09.2019</p> <p><u>Geplant:</u> im 1. Jahr nach Abschluss</p>
---	---	--	--