

Modulares Prognosemodell für den einsatzspezifischen Energieverbrauch von Gabelstaplern

Modular forecast model for a
use-specific energy consumption of industrial trucks

Timo Schilling
Rainer Bruns

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik
Fakultät für Maschinenbau
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg*

Flurförderzeuge leisten einen wesentlichen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen in der EU. Aktuell wird ihr Verbrauch in Deutschland in der Regel per VDI-Zyklus prognostiziert. Dieser hat allerdings keinen Bezug zu dem tatsächlichen Nutzungsprofil eines konkreten Flurförderzeugs. Es soll untersucht werden, inwiefern ein modularer Aufbau, der sich einsatzspezifisch anpassen lässt, eine verbesserte Prognose der Verbräuche ermöglicht. Zudem soll analysiert werden, wie viel Mehraufwand diese verbesserte Möglichkeit der Vorschage für die Hersteller bzw. die Nutzer bedeutet. Am MTL ist ein Messsystem aufgebaut worden, welches neben dem Energieverbrauch auch die Einflussparameter aufnimmt. Es werden exemplarische Messungen vorgestellt.

[Schlüsselwörter: Effizienz von Flurförderzeugen, Nutzungsprofil, Verbräuche, Prognosemodell]

Industrial trucks are responsible for a substantial contribution to the total greenhouse gas emissions in the EU. In Germany the VDI-Cycle is the current instrument to forecast the energy or fuel consumption of industrial trucks. This driving cycle is slightly different for some truck types, but not related to the individual usage profile of a specific vehicle. It shall be evaluated how a modular designed prognosis model delivers an improved forecast. The evaluation will consider the additional effort which might be combined with this new approach. The MTL measurement system records the energy consumption of an industrial truck. Additionally it records important influence parameters. First measurements are described exemplarily in this paper.

[Keywords: energy efficiency, industrial trucks, driving cycles, consumption prognosis]

1 EINLEITUNG

Der Energieverbrauch ist für die Betreiber von Gabelstaplern aus zahlreichen Gründen von Interesse. Neben den Betriebskosten geraten zukünftige gesetzgeberische Maßnahmen sowie andere umweltbezogene Aspekte zunehmend in den Fokus. Kunden entscheiden heute auch in der Logistik verstärkt nach umweltbezogenen Gesichtspunkten [Cha09]. Eine möglichst genaue Prognose der Energieverbräuche gibt den Betreibern daher Planungssicherheit.

1.1 UMWELTASPEKTE VON FLURFÖRDERZEUGEN

Das zurückliegende Gemeinschaftsforschungsvorhaben „Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik“ der Helmut-Schmidt-Universität mit der Technischen Universität München und dem Karlsruher Institut für Technologie hatte sich 2011 und 2012 die Identifizierung und Analyse der relevanten Umweltaspekte von Intralogistiksystemen zum Ziel gesetzt [Sch13]. Dieses Projekt hat ergeben, dass Flurförderzeuge durchaus für einen wesentlichen Teil des gesamten Treibhausgasausstoßes der Europäischen Union verantwortlich sind.

In dem genannten Projekt wurden drei verschiedene Berechnungsverfahren angewendet. Sie hatten unterschiedliche Blickwinkel: In einem Verfahren wurden primär die Produktionswerke betrachtet (s. Abbildung 1 oben), im Zweiten die gesamte europäische Flurförderzeugflotte (s. Abbildung 1 unten) und im letzten Verfahren konkrete Fahrzeugmodelle.

Die gesamte Flurförderzeugflotte in der Europäischen Union (EU-27) stieß in 2010 je nach Berechnungsgrundlagen zwischen 9,6 und 13,7 Megatonnen Treibhausgase aus [Sch13]. Die Nutzung macht dabei bis zu 95 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus eines Flurförderzeugs aus. Der restliche Teil fällt fast ausschließlich der Produktionsphase zu. In der Entsorgungsphase können z.B. über Recycling teilweise sogar Treibhausgasemissionen eingespart werden.

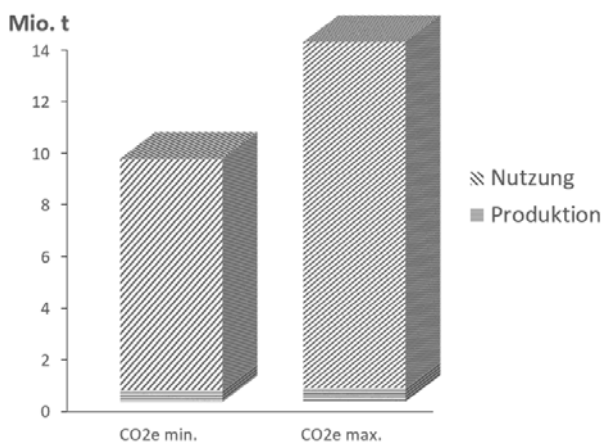
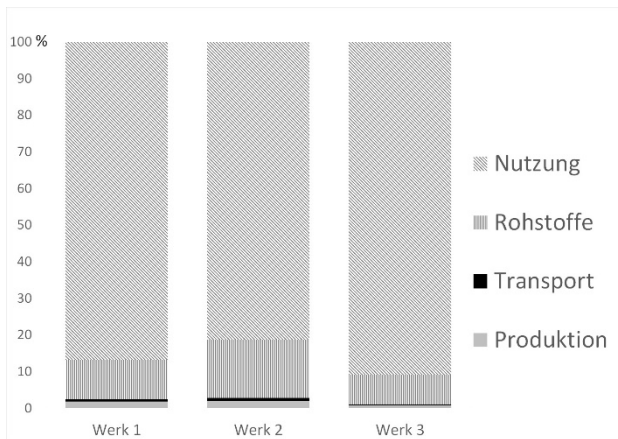


Abbildung 1: Relativer Treibhausgasausstoß je nach Lebensphase an beispielhaften Herstellern/Werken (oben); Absoluter und relativer CO₂-Äquivalent-Ausstoß aller Ffz in der EU-27 in 2010 abhängig vom min. bzw. max VDI-Verbrauch (unten) [Sch13]

Um die drei unterschiedlichen Berechnungsverfahren zu vergleichen, wurde der Treibhausgas-Ausstoß eines 2,5 t-Elektro-Gegengewichtstaplers mit diesen Verfahren berechnet. Übereinstimmend ergab sich ein Ausstoß von ungefähr 50 bis 60 t Treibhausgasen über den gesamten Lebenszyklus dieses Staplers.

1.2 REGULATORISCHE MAßNAHMEN

Bisher gibt es in Deutschland und der EU keine staatlichen regulatorischen Maßnahmen bezogen auf die Verbrauchseffizienz von Flurförderzeugen. Aufgrund der Erkenntnis, dass Flurförderzeuge einen wesentlichen Anteil an den Treibhausgasemissionen innerhalb der EU stellen, ist zu erwarten, dass der Gesetzgeber zukünftig Anforderungen an deren Effizienz stellen wird.

Dies wird voraussichtlich über die sogenannte Öko-design-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG) geschehen. Sie legt Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von sogenannten energieverbrauchsrelevanten Produkten fest.

Durchführungsmaßnahmen legen in Form von europäischen Verordnungen die betreffenden Produkte bzw. Produktgruppen fest. Sie enthalten zudem die spezifischen energieverbrauchsrelevanten Anforderungen an diese Produkte. Beispiele für bereits geregelte Produktgruppen sind Kühlschränke oder Fernseher. Alle drei Jahre legt die Europäische Kommission in einem Arbeitsplan fest, welche Produktgruppen zukünftig behandelt werden. Es wird erwartet, dass die Flurförderzeuge in den nächsten Jahren u.a. aus dem oben genannten Grund zu den ausgewählten Produktgruppen gehören werden.

2 PROGNOSE VON VERBRÄUCHEN

Eine Möglichkeit der Prognose des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs von Fahrzeugen stellen standardisierte Fahrzyklen dar. Allgemein bekannt ist vor allem der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), nach dem die Verbräuche von Pkw ermittelt werden, die der Kunde auf einem Label des Herstellers nachlesen kann. Dieser soll zukünftig durch einen weltweit harmonisierten Zyklus abgelöst werden (WLTP)¹.

In Deutschland enthält die VDI-Richtlinie 2198 „Typenblatt für Flurförderzeuge“ einen standardisierten Fahrzyklus für Gabelstapler, Hubwagen etc. [VDI12]. Dieser setzt sich pro Arbeitsspiel aus zwei Fahrstrecken und zwei Hubvorgängen zusammen. In 60 Minuten sind 60 Arbeitsspiele mit Nennlast zu fahren (s. Abbildung 2).

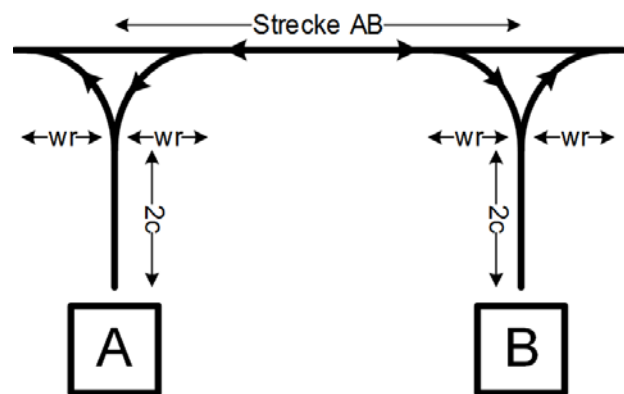


Abbildung 2: Ablauf des VDI-Zyklus, wr= Wenderadius, c=Lastschwerpunkt Abstand [i.A.a. VDI12]

Anhand dieses Fahrzyklus wird der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch pro Stunde ermittelt, der dann im Typenblatt angegeben wird. Es gibt allerdings keine Variationsmöglichkeiten je nach Einsatzzweck. Daher lässt sich kein Schluss ziehen, wie sich der Verbrauch des einzelnen

¹ NEFZ nach europäischer Richtlinie 70/220/EWG; WLTP steht für Worldwide harmonized light vehicles test procedures.

Staplers bei einer Änderung eines spezifischen Fahrscenarios verhält. Der VDI-Zyklus ist zudem unter den Herstellern nicht sehr verbreitet und bietet auch deshalb nur eine eingeschränkte Transparenz und Vergleichbarkeit.

Einige der folgenden Vor- und Nachteile des VDI-Zyklus haben sich bei den aktuellen Messungen am MTL gezeigt. Andere ergaben sich bei der Auswertung der Messungen:

Vorteile des VDI-Zyklus

- einfacher Aufbau
- anschaulich: Enthält Transport- und Hubvorgänge
- keine hohen Anforderungen an die Durchführung/ Aufbau der Teststrecke

Nachteile des VDI-Zyklus

- Messungen der Hersteller geben einen optimierten Verbrauch wieder
- Zeitaufwand zur Durchführung recht hoch
- Zusatzverbraucher werden nicht betrachtet
- nur eingeschränkte Vergleichsmöglichkeit zweier VDI-Verbräuche
- Zyklus praktisch nicht zweimal exakt gleich durchführbar
- gibt nur ein ganz bestimmtes Nutzungsprofil wieder und lässt sich nicht anpassen

Unabhängig vom VDI-Zyklus geben die Hersteller beim Verkauf sicherlich individuell Auskunft über die Verbräuche ihrer Geräte. Die dahinter stehenden Annahmen, Parameter etc. bleiben oft unbekannt und unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller.

Momentan wird der VDI-Zyklus in die Norm DIN EN 16796 „Energieeffizienz von Flurförderzeugen“ aufgenommen [DIN14]. Die Normung der Energieeffizienz könnte schlussendlich zu einer obligatorischen Angabe eines Verbrauchswertes für die Flurförderzeughersteller nach dieser Norm führen.

3 EINSATZSPEZIFISCHES MODELL

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines neuartigen Prognosemodells, das sich je nach Nutzungsprofil des einzelnen Flurförderzeugs anpassen lässt und dann dessen Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch für diesen spezifischen Einsatz vorhersagt. Dadurch sollen bisherige Nachteile wie die eingeschränkte Transparenz und die unsichere Prognostizierbarkeit der zukünftigen Verbräuche vermieden werden.

Der Einsatz eines Gabelstaplers soll dazu in mehrere unterschiedliche Elemente, wie z.B. Fahr- und Hubanteile, zerlegt werden. Diese lassen sich dann wiederum in

gleichartige Teile zerlegen, wie z.B. Vorwärts- und Rückwärtsfahrt. Schlussendlich erhält man die sogenannten elementaren Arbeitsvorgänge. Das sind die grundlegenden Bausteine, aus denen sich dann der gesamte Fahrzyklus bzw. reale Einsatz eines Gabelstaplers zusammensetzen lässt. Es soll eruiert werden, inwiefern sich die elementaren Kraftstoff- bzw. Energieverbräuche analog zu den einzelnen elementaren Arbeitsvorgängen aufsummieren lassen (s. Abbildung 3).

Es wird analysiert, inwiefern sich die Prognosen mittels dieses neuartigen Modells verbessern lassen und mit wie viel Mehraufwand dies verbunden ist. Zunächst wird das Modell exemplarisch an einem Elektrogegengewichtstapler entwickelt, erprobt und validiert.

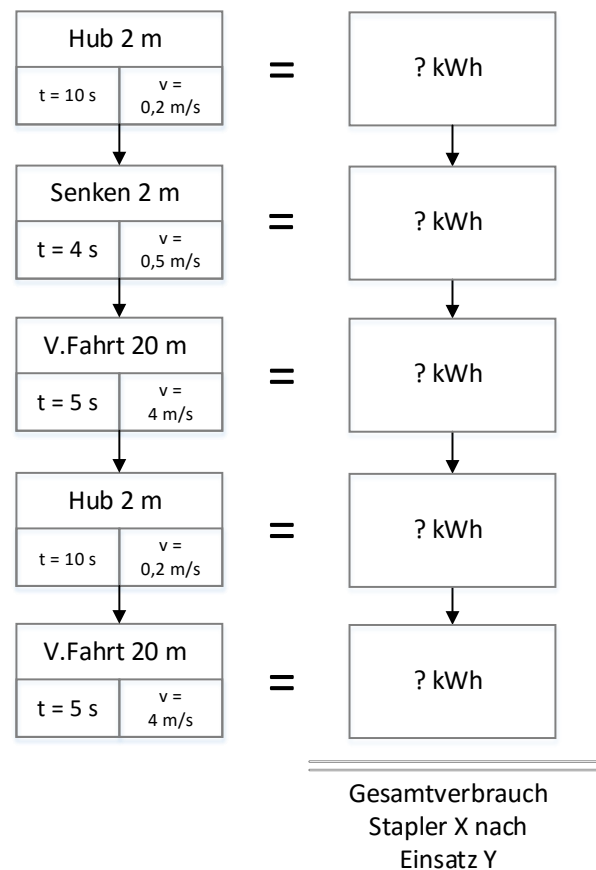


Abbildung 3: Modularer Aufbau eines Arbeitsspiels, beispielhafter Einsatzfall Y

Ein wichtiges Zielkriterium bei der Entwicklung des Modells ist die pragmatische Anwendbarkeit durch Hersteller und Nutzer von Flurförderzeugen. Es wird erwartet, dass der Aufwand zur Ermittlung der Verbräuche mittels des geplanten Verfahrens höher ist, als per VDI-Zyklus. Das liegt daran, dass der Hersteller die Energieverbräuche

jedes Bausteins einzeln messen und der Anwender das Nutzungsprofil des Staplers kennen muss, um es in das Modell eingeben zu können. Der Nutzen durch die genauere, einsatzspezifische Prognose der Verbräuche muss den Mehraufwand übersteigen.

3.1 AUFBAU DES MODELLS

Das Arbeitsspiel eines Staplers lässt sich in einem ersten Schritt in Fahren und Heben unterteilen. Diese Vorgänge lassen sich dann weiter in gleichartige Vorgänge untergliedern und die Betrachtung auf andere Vorgänge erweitern (z.B. Neigen, Seitenschieben). Das Fahren lässt sich z.B. weiter unterteilen in Vorwärts- und Rückwärtsfahren, der Hubvorgang wird getrennt in Heben und Senken.

Im Anschluss an die Identifizierung der elementaren Arbeitsvorgänge sollen deren Einflussparameter bestimmt werden.

Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen eine Auswahl von Einflussparametern, die bei der Unterteilung berücksichtigt werden müssen. Die Arbeitsvorgänge Fahren und Heben lassen sich dann noch weiter zerlegen. Das Fahren lässt sich z.B. je nach Länge der Fahrstrecke unterteilen.

Tabelle 1: Einflussparameter auf den Verbrauch beim Fahren

	Fahren		
Fahrstreckenlänge	kurz	mittel	lang
Fahrtrichtung	geradeaus	großer Kurvenradius	kleiner Kurvenradius
Geschwindigkeit	niedrig	mittel	hoch
Beschleunigung	niedrig	mittel	hoch

Tabelle 2: Einflussparameter auf den Verbrauch beim Hub

	Heben		
Hubhöhe	niedrig	mittel	hoch
Hublast	ohne	wenig	viel
Geschwindigkeit	hoch	mittel	niedrig
Beschleunigung	hoch	mittel	niedrig

4 MESSFAHRTEN

Um die elementaren Arbeitsvorgänge und deren Einflussfaktoren inkl. ihrer Wertebereiche zu bestimmen, werden am MTL Fahrversuche durchgeführt. Diese Ver-

suche dienen vor allem der Messung der Energieverbräuche.

Die Fahrten sollen für die einzelnen elementaren Arbeitsvorgänge, aber auch für aus mehreren Vorgängen zusammengesetzte Fahrzyklen durchgeführt werden. Um die gemessenen Verbräuche bewerten und den exakten Arbeitsvorgängen zuordnen zu können, werden zusätzlich die Einflussparameter bestimmt. Dazu werden parallel zu den Energieverbräuchen die Drehzahlen beider Vorderräder, die Hubhöhe und die Lastmasse aufgenommen.

4.1 MESSAPPARATUR

Am MTL wird eine Messapparatur zur Messung des Energieverbrauchs und der Bestimmung der Einflussparameter aufgebaut (s. Abbildungen 4 und 5). Sie soll permanent die direkt an der Batterie anliegenden Werte von Strom und Spannung messen und zudem die Raddrehzahlen der Vorderräder, die Hubhöhe, ggf. die Hubgerüstneigung und die Lastmasse erfassen.



Abbildung 4: Hallsensor mit Zahnrad, montiert am Vorderrad

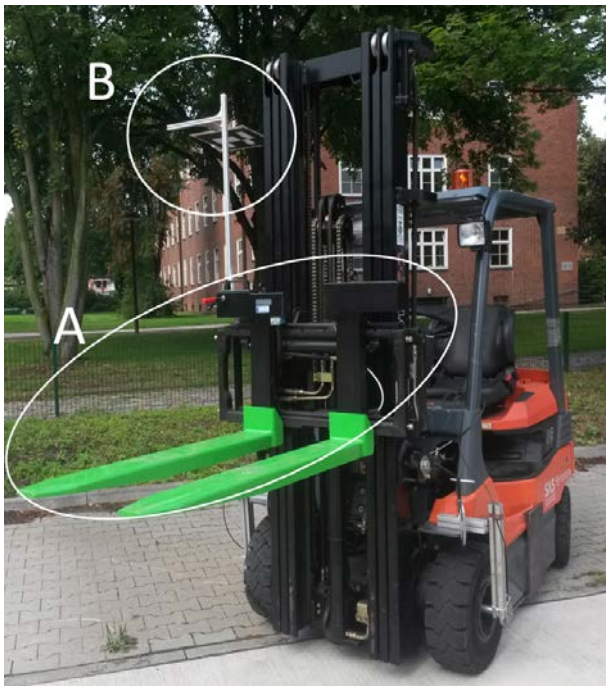


Abbildung 5: Messapparatur: Wägegabeln (A), AR-Marker zur Hubhöhenerkennung (B)

Während der Fahrt werden die Geschwindigkeiten der beiden Vorderräder aufgenommen. Dies geschieht über Hallensensoren, die die Zähne eines an die Felge montierten Zahnrades zählen. Die Hallensensoren können zudem die Drehrichtungen der Zahnräder erkennen, so dass auch die Fahrtrichtung bestimmt werden kann. Über die Rollrichtung und Drehzahl der Räder kann die Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und der Kurvenradius berechnet werden.

Die Hubhöhe wird über eine Kamera per Bilderkennung ermittelt. Am Gabelträger befindet sich ein Marker. Es handelt sich hierbei allerdings um eine vorläufige Lösung, da sie sich als unpraktikabel erwiesen hat. Dieses Messverfahren wird kurzfristig durch einen Laserentfernungsmesser ersetzt.

Die Lastmasse wird mit Hilfe von handelsüblichen Wägegabeln ermittelt. Diese sendet die Lastmasse über ein Funkmodul an einen Empfänger. Der Funkempfänger verfügt über einen USB-Anschluss und ist somit über eine COM-Schnittstelle auszulesen.

4.2 BEISPIELHAFTE TESTSZENARIEN

Zur bildhaften Darstellung des Vorhabens wurde ein an den VDI-Zyklus angelehnter Testzyklus gefahren. Er wurde vereinfacht, um möglichst wenig unterschiedliche Vorgänge zu betrachten.

Dieser Zyklus setzt sich aus zwei Fahrstrecken von je 30 Metern und zwei Hubvorgängen auf zwei Meter Hub-

höhe zusammen. Gefahren wurde jeweils mit 1020 kg Traglast. Die Fahrt wurde jeweils nach dem Hub abweichend zum VDI-Zyklus vorwärts fortgesetzt, so dass zwei parallele, gleichwertige Fahrspuren entstanden.

Der Testzyklus wurde sowohl vollständig (Testfahrt 1), als auch in Teilen (Testfahrten 2 und 3) durchfahren, um den modularen Aufbau des Modells zu verdeutlichen. In weiteren Schritten lässt sich der Zyklus dann in noch kleinere Bausteine zerlegen.

Die erste Testfahrtrunde umfasst den gesamten oben genannten Zyklus, inklusive Fahren und Heben (s. Abbildung 6). Ein Arbeitsspiel setzt sich wie folgt zusammen: Gestartet wird auf Position A. Die Last wird auf zwei Meter gehoben und anschließend sofort auf Fahrhöhe gesenkt. Es folgt eine Fahrt zu Position B (in ca. 30 m Entfernung). Dort wird die Last erneut auf zwei Meter gehoben und wieder auf Fahrhöhe gesenkt. Es folgt die Rückfahrt zu Position A. Dann beginnt dort das nächste Arbeitsspiel. Die Dauer eines Arbeitsspiels beträgt 60 Sekunden (je Hubvorgang 10 Sekunden, je Fahrt 20 Sekunden). Es werden 60 Arbeitsspiele ausgeführt.

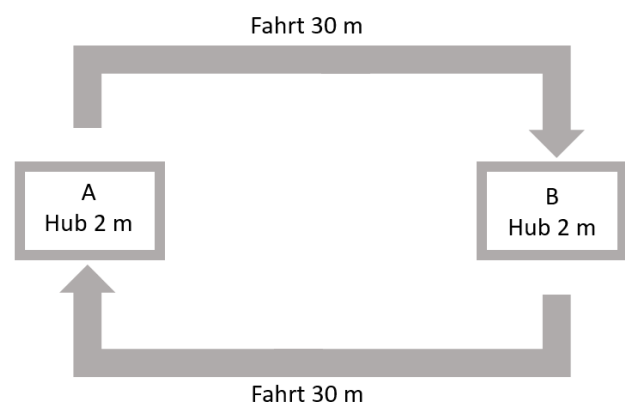


Abbildung 6: Testfahrt 1, angelehnt an den VDI-Zyklus

Für die erste Erprobung des Messsystems wurden je Testfahrt fünf Arbeitsspiele durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zum Vergleich auf 60 Arbeitsspiele (bzw. Anzahl der einzelnen Vorgänge in einem vollständigen Zyklus je Stunde) hochgerechnet.

Im Mittel hat der Stapler bei Testfahrt 1 4,1 kWh pro Stunde (60 Arbeitsspiele) verbraucht. Es erwies sich für den Fahrer als relativ schwer, die Zyklen gleichmäßig zu fahren. Bei der händischen Vermessung der Strecken wurden die Ein- und Ausfahrten zu den Positionen nicht berücksichtigt. Die nachträgliche Auswertung der Fahrstrecke zeigt, dass der Stapler im Mittel 3.982 m in einem Fahrzyklus zurückgelegt hat. Da der Fahrer die geforderte Zeitdauer nicht exakt einhalten konnte, betrug die mittlere Zeitdauer der Messungen 3.593 Sekunden.

Die zweite Testfahrt umfasst ausschließlich den Fahranteil des oben genannten Zyklus (s. Abbildung 7). Um vergleichbare Ergebnisse erhalten zu können, wurde die gleiche Messdauer angestrebt. Abzüglich des Hubanteils von 20 Sekunden pro Arbeitsspiel ergibt sich für 60 Arbeitsspiele eine Zeitdauer von 40 Minuten. An den Punkten A und B wurde bei jeder Fahrt angehalten.

Diese Testfahrt wurde ebenfalls fünf Mal durchgeführt. Im Mittel hat der Stapler 1,79 kWh in 40 Minuten verbraucht. Dabei legte der Stapler im Mittel 3.893,5 m zurück.

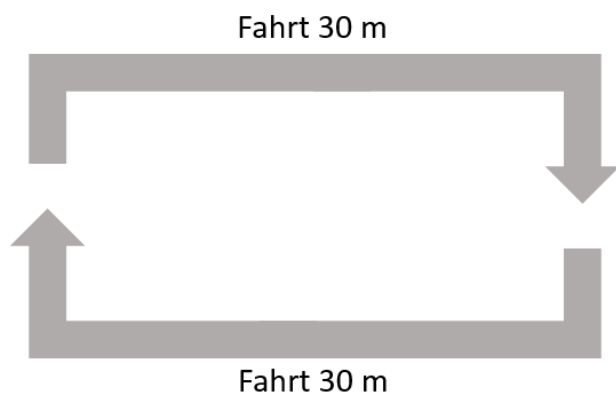


Abbildung 7: Testfahrt 2, Anteil Fahren

Die letzte Testfahrt umfasst ausschließlich den Hubvorgang aus dem oben genannten Fahrzyklus (s. Abbildung 8). Jedes Arbeitsspiel enthält zwei Hubvorgänge. Bei 60 Arbeitsspielen ergeben sich 120 Hubvorgänge. Die Dauer pro Hubvorgang (Heben und Senken) war an den Testzyklus angepasst und dauerte durchschnittlich 10 Sekunden. Im Mittel benötigte der Teststapler 1,52 kWh in 20 Minuten.

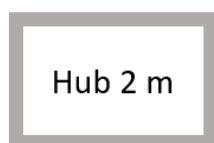


Abbildung 8: Testfahrt 3, Anteil Heben

Der Vergleich der Energieverbräuche der Einzelfahrten mit dem Energieverbrauch des gesamt gefahrenen Testzyklus zeigt nun, dass die Addition der Energieverbräuche der beiden Einzelteile nicht das gleiche Ergebnis liefert, wie der Verbrauch des Gesamtzyklus (4,1 kWh zu 3,31 kWh). Alle Testfahrten wurden allerdings unter den gleichen Bedingungen durchgeführt.

In diesem frühen Stadium des Projektes kann die Abweichung der Messwerte vielfältige Gründe haben. Einerseits ist das Messsystem noch nicht abschließend validiert worden und beinhaltet möglicherweise diese Fehler. Andererseits handelt es sich bei diesen Messwerten um exemplarische Messungen, die jeweils auf 60 Arbeitsspiele hochgerechnet wurden. Es bedarf weitergehender Messungen, um genauere Aussagen treffen zu können.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Durch dieses Forschungsvorhaben soll ein modular aufgebautes Prognosemodell für die Kraftstoff-/Energieverbräuche von Gabelstaplern erstellt werden. Dazu sollen Bausteine bestimmt werden, aus denen das spezifische Nutzungsprofil jedes Staplers zusammengesetzt werden kann.

Um den Ansatz bildlich darzustellen, wurden drei Testzyklen gemessen und gegenübergestellt. Es ist ein Testzyklus inklusive Fahr- und Hubanteilen vollständig gemessen worden. Zudem ist er in einen Fahr- und einen Hubteil zerlegt und diese getrennt gemessen worden. Erwartet wurde ein vergleichbarer Energieverbrauch beim Vergleich des Gesamtzyklus zu der Addition der getrennt gemessenen Einzelteile des Zyklus. Dies hat sich nicht bestätigt und soll weiter analysiert werden.

In weiteren Schritten soll eine detaillierte Betrachtung der Fahrzyklen durchgeführt werden. Dazu werden die Daten des MTL-Messsystems ausgewertet. Die einzelnen Bestandteile des Messsystems müssen teilweise noch validiert werden.

Im Anschluss an die Messungen sollen sämtlicher Einflussparameter verglichen werden, um den jeweiligen Energieverbrauch in Bezug zu der tatsächlichen Transport- und Hubleistung zu setzen.

LITERATUR

- [Cha09] Change to Green: Handlungsfelder und Perspektiven für nachhaltige Logistik und Geschäftsprozesse; Eine Studie des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München; Markt und Wirtschaft - Gesellschaft für Marktforschung und Unternehmensberatung; Der Unternehmensberatung Trilog|Qa sowie des Fachmagazins LOGISTIK HEUTE. 1. Aufl. München : Huss-Verl, 2009
- [DIN14] DIN EN 16796-1: 2014, Energieeffizienz von Flurförderzeugen - Testmethoden, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2014
- [Sch13] Schilling, T.; Frenkel, A.; Bruns, R.; Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Braun, M.; Linsel, P.; Furmans, K: *Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik*. Forschungsbericht des IGF-Vorhabens 16973 N der Forschungsvereinigung Intralogistik Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e. V., Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik, Hamburg, Garching, Karlsruhe, 2013
- [VDI12] VDI-Richtlinie 2198: Typenblatt für Flurförderzeuge, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Beuth, Berlin, 2012

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns hat Luft-und Raumfahrttechnik in Braunschweig studiert und ist seit 1992 Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Technische Logistik an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg.

Dipl.-Wi.-Ing. Timo Schilling hat Wirtschaftsingenieurwesen mit den Schwerpunkten Logistik und Produktentwicklung an der Universität Bremen studiert. Er ist seit 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik.

Adresse: Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fakultät für Maschinenbau, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

E-Mail: rainer.bruns@hsu-hh.de

Tel.: 040 6541 / 2855

E-Mail: timo.schilling@hsu-hh.de

Tel.: 040 6541 / 2773