

Automatische elektrische Lenkung zur Effizienzsteigerung von Langguttransporten

Automatic electric steering to increase the efficiency of long goods transports

Sergey Stepanyuk
Stephan Ulrich
Rainer Bruns

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr in Hamburg*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die systematische agile Entwicklung eines Langguttransporters beschrieben. Der bestehende Markt für Langguttransporte wurde analysiert, worauf ein Fahrzeug basierend auf den Erkenntnissen aus dem Routenzugbereich entwickelt wurde. Lenkkonzepte für das Fahrzeug wurden untersucht und dann in einem Prototyp umgesetzt. Ergebnisse der Testphase bei einem Anwender wurden analysiert, um einen universalen Kommissionieranhänger für Langgut zu etablieren.

[Schlüsselwörter: Langgut, Intralogistik, Kommissionieren, Regelung, agile Entwicklung, autonome Systeme]

This paper describes the systematic and agile development of a long goods transporter. The existing market for long goods transport was analyzed, and a vehicle based on the findings from the tigger-trailer sector was developed. Steering concepts for the vehicle were developed and then implemented in a prototype. Results of the test phase at a user site were analyzed in order to establish a universal order picker for long goods.

[Keywords: long goods, intralogistics, picking, control algorithm, agile development, autonomous systems]

1 EINLEITUNG

Der Transport und die Kommissionierung von Langgütern stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Eine Analyse der hierfür eingesetzten Fördertechnik, ergab dass insbesondere die bestehenden Lösungen für die Langgutkommissionierung entweder nur eine geringe Umschlagsleistung haben und unflexibel sind oder hohe Kosten verursachen. Vor allem für den horizontalen Transport über längere Strecken im Anschluss an den eigentlichen Kommissioniervorgang sind keine effizienten Lösungen vorhanden. Zusammen mit einem Industriepartner sollte daher ein spezielles Gerät für die Kommissionierung und den Transport von Langgütern entwickelt werden, bei dem nur

ein Fahrer sowohl für den Transport auf langen Strecken als auch beim Manövrieren im Kommissionierbereich notwendig ist. Eine hohe Wendigkeit und eine einfache Bedienung des Transportgerätes standen dabei im Vordergrund. Zudem sollte der Anhänger automatisch mit dem zum Ziehen verwendeten Flurförderzeug gekoppelt werden können. Darüber hinaus sollten die bisher im Betrieb verwendeten Ladungsträger ohne Veränderungen weiterhin genutzt werden können.

2 STAND DER TECHNIK

In vielen produzierenden Betrieben werden Langgüter transportiert, gelagert, kommissioniert und umgeschlagen. Der Grad der Motorisierung und der Automatisierung der damit einhergehenden Materialflüsse ist von deren Intensität abhängig. Werden in einem Betrieb zum Beispiel nur gelegentlich Langguthalbzeuge für die Produktion benötigt, erfolgen die TUL-Prozesse manuell ohne Spezialgeräte. Die Halbzeuge werden per LKW in kleineren Chargen angeliefert, mit einem Kran oder Gabelstapler entladen und in ein Kragarmregal eingelagert. Die Entnahme erfolgt einzeln, wonach die Langgüter auf die Länge gekürzt, in die richtige Form gebogen und anschließend verarbeitet werden. Bei einer guten Planung der Produktionsstätte sind die Wege kurz und die Maschinen, die für die Langgutverarbeitung benötigt werden, sind in der Nähe des Langgutlagers platziert.



Abbildung 1: Fahrgestell auf Rollen für Langgut (Quelle: JUMA Logistik GmbH)



Abbildung 2: Langgutfahrrahmen (Quelle: Gabriel Transportsysteme GmbH)

Beim Transport größerer Mengen über längere Strecken werden spezielle Langgutrollpaletten verwendet (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2). Für die manuelle Beförderung der beladenen Langgutrollpaletten werden meistens mehrere Personen benötigt und die maximale Geschwindigkeit ist nur auf Schrittempo begrenzt. Diese Transportmöglichkeit bietet sich ebenfalls in Produktionslinien an, wo aufgrund der engen Platzverhältnisse keine motorisierten Transportgeräte eingesetzt werden können.

Auf kurzen Strecken können die Langgüter ebenfalls mit einem Kran bewegt werden. Die niedrige Transportgeschwindigkeit und die benötigten Anschlagzeiten machen diese Vorgehensweise nur bei geringen Materialströmen wirtschaftlich. Die Auslagerung aus Regalen und die Vorbereitung zum Kommissionieren kann automatisiert mit dem Kran erfolgen. Krane werden ebenfalls in großen Lagerhallen für die Ein- und Auslagerung bei Stahlproduzenten und im Stahlhandel verwendet.



Mit steigendem Materialdurchsatz und schwereren Lasten wird das händische Schieben der Langgutrollpaletten unpraktikabel. Daher kommen dann verstärkt motorisierte Fördermittel zum Einsatz. Die erste Motorisierungsstufe stellt das Ziehen der Langgutrollpaletten mit einem Schlepper oder einem Niederhubwagen dar, die mit an die Langgutrollpalette angepassten Kupplungen ausgestattet sind. Gesteuert werden diese Kombinationen aus motorisiertem Flurförderzeug mit Anhänger/Rollgestell manuell

von einem Fahrer. Ein weiterer Arbeiter verfolgt die Langgutrollpalette und übernimmt ebenfalls die Lenkung. Der Einsatz eines Schleppers verringert zwar die Belastung deutlich und erhöht die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit, dennoch müssen von den Arbeitern pro Arbeitsschicht lange Strecken zurückgelegt werden. Für diese Vorgehensweise sind somit 2-3 Arbeiter notwendig, unter denen einer die entsprechende Fahrerqualifizierung haben muss. Bei dieser Anordnung können auch enge Gassen befahren werden.

Die nachfolgend beschriebenen intralogistischen Lösungen für Langgüter sind vorwiegend für Unternehmen interessant, die primär Langgüter produzieren, kommissionieren und umschlagen. Bei den Fördermitteln in dieser Kategorie handelt es sich um Spezialgeräte bzw. stark modifizierte Seriengeräte. Für den Horizontaltransport können z.B. zwei Sitz-Niederhubwagen mit speziellen Kupplungen ausgestattet werden, wodurch sowohl der Antrieb als auch die Lenkung der Langgutrollpalette von den motorisierten Fahrzeugen übernommen wird (vgl. Abbildung 4). Die Niederhubwagen werden vorne und hinten an die Langgutrollpalette gekoppelt. Die Fahrt erfolgt dann im Verbund der drei miteinander verbundenen Fahrzeuge. Zum Kommissionieren werden gewöhnlich zwei Personen benötigt, eine auf jedem der beiden Elektro-Hubwagen. Ein gravierender Nachteil dieser Transportlösung ist, dass beide Personen eine entsprechende Fahrerlaubnis haben müssen. Die Schulung der Fahrer nimmt mehrere Tage bis Wochen in Anspruch. Außerdem verlangt diese spezielle Aufgabe vom Fahrer ein erhöhtes Maß an Geschicklichkeit. Der Einsatz von Leiharbeitskräften zum Ausgleich der saisonalen Schwankungen ist daher nicht möglich. Nachteilig ist ferner, dass höher gelegenen Regalebenen nicht erreicht werden können, da den Fahrzeugen die hierfür erforderliche Hubfunktion fehlt. Daher müssen für die Kommissionierung aus höheren Regalebenen die Paletten aus dem Regal frühzeitig mit einem anderen Gerät ausgelagert und im Gang abgestellt werden. Das kann entweder mit einem Kran, einem Gabelstapler oder einem Spezialgerät erfolgen. Die IT-gestützte Koordination dieser Vorgänge kann zu Komplikationen führen.





Abbildung 5: Langgutkommissionierer Hubtex MU 15 (Quelle: HUBTEX)

Für Transporte über längere Strecken im Outdoor-Bereich und mit höherer Geschwindigkeit werden Mehrwegestapler verwendet. Diese verbinden eine hohe Wendigkeit mit der Möglichkeit die Langgüter seitlich aufzunehmen. Die Mehrwegestapler eignen sich auch hervorragend, um die Paletten mit Langgut aus Regalen herauszunehmen. Meistens beinhalten die Fahrzeuge nur einen Fahrerplatz, was die Zusammenstellung der Aufträge in einem festen Team schwieriger macht. Eine zweite Person muss stets in der Nähe des entsprechenden Regals warten, um eine hohe Pickzahl zu erreichen. Für sehr lange Transportstrecken im Outdoorbereich und zum Stapeln werden auch Seitenstapler verwendet. Fahrzeuge dieser Gruppe haben vergleichsweise große Abmaße, wodurch nicht immer mehrere Teams gleichzeitig in einem Gang eingesetzt werden können.

Zum Zusammenstellen der Aufträge werden vermehrt Langgutkommissionierer verwendet (s. Abbildung 5). Diese haben je nach Ausführung auch genug Arbeitsplatz für mehrere Werker sowie eine Ablagefläche. Solche Fahrzeuge sind speziell für enge Platzverhältnisse bei kleiner und mittlerer Umschlagsleistung ausgelegt. Vor allem die Möglichkeit einzelne Einheiten des Langgutes aus höheren Ablageplätzen zu entnehmen, macht diese Fahrzeuge einzigartig.

Die Ausrichtung der Lagerplätze spielt für ein Langgutlager eine entscheidende Rolle. Sind die Fächer parallel zum Gang ausgerichtet, können die Fahrrahmen oder Langgutpaletten einfacher mit einem Stapler entnommen werden. Gleichzeitig sinkt aber die Flächennutzung des Lagers, da mehr Gänge benötigt werden. Bei einem hohen

Materialfluss und einem breiten Sortiment können die Lageplätze Senkrecht zum Gang angeordnet werden. Die Entnahme einzelner Artikel erfolgt manuell. Ein ausfahrbares Regal stellt einen Kompromiss dar. Die durchschnittliche Menge der pro Auftrag entnommenen Artikel entscheidet darüber welche Lageranordnung wirtschaftlicher ist.

Die Produktstruktur, die Lagerrestriktionen und die benötigte Umschlagsleistung entscheiden darüber, welche technischen Hilfsmitteln bzw. deren Kombination für die Aufgabe sinnvoll und wirtschaftlich sind. Bei größeren Unternehmen können die Logistikherausforderungen nur mit einer Kombination verschiedener Fahrzeugklassen bewältigt werden.

Bei der vorliegenden Studie diente das Kommissionierlager eines Fensterrahmenprofilproduzenten als Referenz. Die logistischen Herausforderungen zeichneten sich durch eine sehr hohe Umschlagsleistung im Indoor- und Outdooreinsatz aus. Dabei ist die Produktpalette sehr breit gefächert (über 1600 unterschiedliche Profilgeometrien) und die Wege im Lager sind sehr lang. Insgesamt stehen im Lager über 40 000 m² zur Verfügung. Die Aufträge können sowohl sortenrein sein, als auch nach den Anforderungen des Kunden zusammengestellt werden. Aufgrund der langen Transportwege und der hohen Gewichte der Ware muss die Fördertechnik motorisiert sein, um die Mitarbeiter zu schonen und die Umschlagsleistung zu steigern.

Die Umsetzung der Studie erfolgte in einer Kooperation des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Technische Logistik mit den Industriepartnern Wegard GmbH und Gabriel Transportsysteme GmbH auf Basis einer konkreten Kundenanfrage des Fensterrahmenprofilproduzenten.

3 ANFORDERUNGEN AN EINEN LANGGUTTRANSPORTER

Bisher wurden bei dem Fensterrahmenprofilproduzenten pro Palette zwei Sitz-Niederhubwagen verwendet, die über eine angepasste Kupplung die Paletten angehoben haben und im Verbund gefahren sind (vgl. Abbildung 4). Die Fahrer sind auch für die manuelle Kommissionierung zuständig. Das Fahren im Verbund muss gelernt werden und erfordert vom Fahrer ein erhöhtes Maß an Geschicklichkeit und Fingerspitzengefühl. Somit können für die Hochsaison keine Leihkräfte kurzfristig eingesetzt werden. Die Bestrebungen einen Niederhubwagen durch einen Routenzug oder ein halbautonomes Fahrzeug zu ersetzen, wurden in dem betrachteten Unternehmen schon seit mehreren Jahren verfolgt. Eine hierfür geeignete Lösung existiert auf dem Markt zur Zeit nicht. Vor allem der Einsatz auf sehr schmalen Wegen sowie die zum effizienten Kommissionieren notwendige Wendigkeit konnten mit einem angepassten Routenzug nicht erreicht werden. Somit kam es zur Entscheidung eine für diese spezielle Aufgabe zugeschnittenes

neuartiges Transportgerät entwickeln und herstellen zulassen.

Die Anforderungen an das Fahrzeug können in mehrere Bereiche aufgeteilt werden: Lastaufnahmemittel, Fahrwerk, Steuerung und Regelung, sowie die Anbindung zum Schleppfahrzeug. Die beim Kunden eingesetzte Langgutrollpalette besitzt vier Rollen und kann im leeren Zustand von einer und im beladenen Zustand von zwei Personen verfahren werden. Für die beladene Palette wurde eine maximale Bruttomasse von 1600 kg angenommen, da für höhere Lasten das manuelle Verfahren nicht mehr möglich ist. Die eingesetzten Paletten dürfen nicht verändert werden, um die Kompatibilität mit der restlichen Transporttechnik nicht zu gefährden und den Aufwand der Umstellung gering zu halten. Die Langgutrollpalette muss manuell in das Fahrzeug eingeschoben werden können. Das unbeabsichtigte Herauslösen der Palette beim Fahren muss sicher verhindert werden. Um die Abnutzung der Rollen an der Palette zu minimieren, soll ein Hubwerk installiert werden. Die Palette wird dabei um 80 mm angehoben und besitzt auch bei Bodenunebenheiten und Rampenfahren keinen Bodenkontakt. Der Umriss des Fahrzeugs darf die Dimensionen des Fahrradrahmens nicht signifikant überschreiten, um das gleichzeitige Arbeiten mehrerer Teams in einem Gang weiterhin möglich ist.

Die Anforderungen an das Fahrwerk wurden primär durch die aufzunehmende Last, die Langgutrollpalette, definiert. Das Antriebssystem muss sehr flach gebaut werden, um unter den Fahrradrahmen zu passen. Das Drehmoment der Radverstellung muss auch beim rauen Untergrund ausreichend sein, um die Lenkbewegung im Stand bei voller Beladung ausführen zu können. Alle beweglichen Elemente des Systems müssen auch für Outdoor-Einsatz spritzwassergeschützt und stoßresistent ausgeführt werden.

Auf Wunsch des Anwenders wurden drei verschiedene Betriebsmodi vorgesehen. Wird das Fahrzeug gezogen kann der Mitfahrbetrieb aktiviert werden, bei dem ein spezieller Regelalgorithmus die Lenkung übernimmt und für eine erhöhte Wendigkeit sorgt. Wird in diesem Modus das Fahrzeug hingegen geschoben, behalten die Räder die davor eingestellte Position. Dadurch wird die Anpassung der Position im Rangierbetrieb möglich. Alternativ kann die Lenkung über einen Manipulator ferngesteuert werden. Damit werden auch Fahrmanöver ermöglicht, die im Automatikmodus nicht realisiert werden können. Zusätzlich sollen die Räder quer zum Fahrzeug gestellt werden können, um das seitliche Verfahren zum kompakten Abstellen der Fahrzeuge zu realisieren.

Aufgrund der engen Seitengänge des Langgutlagers und den unübersichtlichen Verhältnissen beim Herausfahren aus einem Seitengang in den Hauptgang sollte der Koppelvorgang schnell und ohne abzusteigen von beiden Seiten möglich sein. Zusätzlich soll eine Koppelstelle in der

Mitte des Fahrzeugs vorliegen, um eine platzsparende Abstellung zu ermöglichen. Die manuelle Steuerung muss intuitiv und sicher sein.

Zum effizienten Kommissionieren wurden die zum Ziehen der Langgutrollpaletten verwendeten Niederhubwagen mit Beifahrerkabinen ausgerüstet. Zusätzlich wurden in den Hubwagen mehrere Sensoren, Lichtschranken und Totmannschalter installiert, um die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten. Der Fahrer muss während der Fahrt die Kupplung im Blick behalten können. Zum Schutz des Beifahrers vor den transportierten Kunststoffprofile wurde außerdem der Beifahrerplatz mit einer Plexiglas-scheibe abgesichert.

4 KONZEPTENTWICKLUNG DES FAHRZEUGS

Am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik wird bereits seit Längerem an der Spurtreue und Implementierung von autonomen Lenksystemen für Routenzuganhänger geforscht [1], [2], [3]. Um die Entwicklungszeit kurz zu halten und agil auf die Änderungen der Kundenanforderungen reagieren zu können, wurde nach Möglichkeit auf die bestehenden Software- und Hardwarelösungen zugegriffen.

4.1 MECHANISCHE KONSTRUKTION

Bei der mechanischen Konstruktion stellten die Anforderungen an die kompakten Außendimensionen die größte Herausforderung dar. Für gute Fahreigenschaften sollen möglichst große Räder verwendet werden. Das steht allerdings im Widerspruch zur flachen Ausführung der Antriebseinheit. Die Langgutrollpalette muss nicht nur über die Lenkachse geschoben werden können, sondern es muss auch ein hinreichend großer Raum vorhanden sein, damit die Beladung auch bei Bodenunebenheiten problemlos möglich ist. Die maximale Höhe der Antriebseinheit wurde mit 220 mm vorgegeben. Eine weitere wesentliche Anforderung ist das Lenken im Stand bei maximaler Zuladung. Die Bohrrreibung der Räder muss unter diesen Bedingungen überwunden werden. Die Lenkachse wurde aus zwei identischen Lenkmodulen aufgebaut. Jedes dieser Module beinhaltet eine EC-Motor-Getriebeeinheit, mit einer großen Untersetzung, einem Lenkwinkel- und einem Geschwindigkeitssensor. Damit die Räder mit Geschwindigkeitssensoren stets den Bodenkontakt haben, muss eine der beiden Fahrzeugachsen als Pendelachse ausgeführt werden, was ein Gegengewicht notwendig macht. Zur kostengünstigen Herstellung des Langguttransporters wurden bei der Schweißkonstruktion vorwiegend Quadratrohre und Brennteile verwendet.

Bei der Entwicklung der Kupplung des Langguttransporters konnten keine kommerziell erhältlichen Standardkomponenten gefunden werden. Nach mehreren Iterationen wurde für den Kuppelmechanismus ein zusätzlicher

Motor installiert. Die für das automatische Ein- und Auskuppeln benötigten speziellen elektrischen Stecker wurden im 3D-Druckverfahren hergestellt. Wie im späteren Abschnitt beschrieben, erwies sich der Stecker als der Hauptschwachpunkt der Konstruktion.

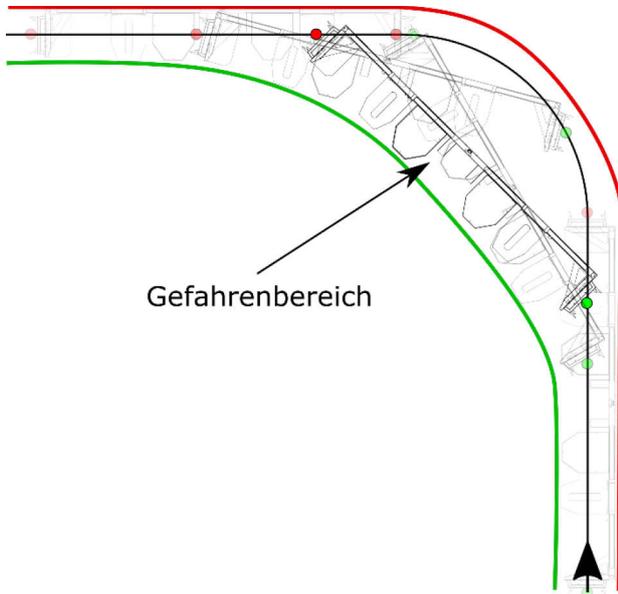


Abbildung 6: Tracking Point befindet sich hinten im Fahrzeug, die Kurve wird stark geschnitten

Die vorhandene Steuerelektronik der selbstlenkenden Achsen für Routenzuganhänger ist für die Ansteuerung von nur einem Lenkmotor mit der dazugehörigen Messelektronik ausgelegt. In dem Langguttransporter müssen durch

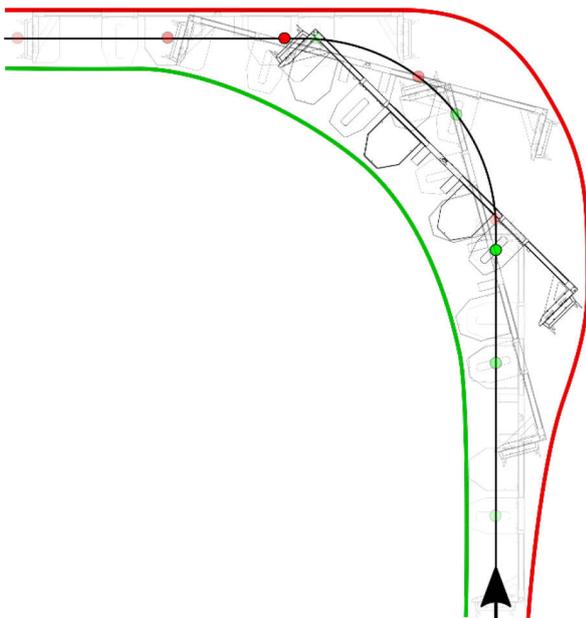


Abbildung 7: Angepasste Lage des Tracking Points, die Kurve wird leicht geschnitten, das Ausbrechen aus der Kurve ist überschaubar und führt nicht zur Gefährdung

die Steuerelektronik dagegen zwei separate Motoren geregelt werden, daher musste den Langguttransporter eine weitgehend neue Steuerelektronik entwickelt werden.

4.2 REGELUNG

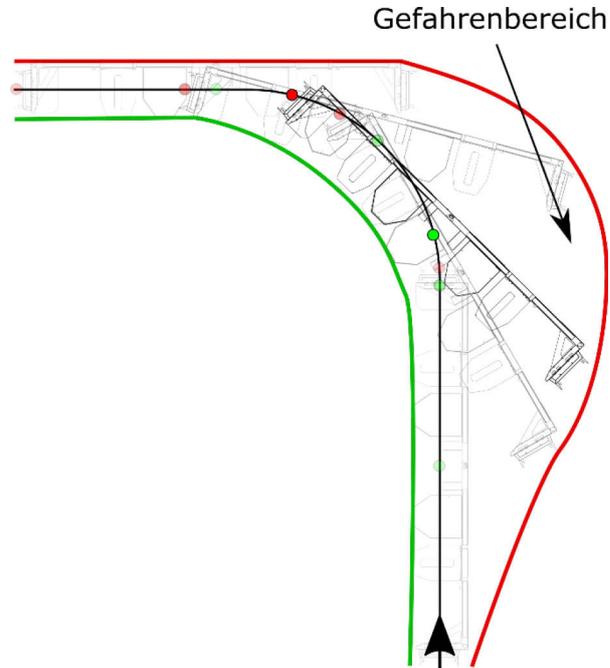


Abbildung 8: Tracking Point befindet sich mittig im Fahrzeug, der Heck vom Fahrzeug bricht beim Abbiegen stark aus

Im Rahmen eines Projektes zur Verbesserung der Spurtreue von Routenzügen wurde am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik ein Algorithmus für die autonome elektronische Lenkung von Routenzugachsen entwickelt. Dabei wird aus den Raddrehzahlen und der Radstellung die Trajektorie des Deichselpunktes geschätzt. Anschließend korrigiert der Regelalgorithmus die Radstellung insofern, dass der Mittelpunkt der Hinterachse entlang der abgespeicherten Trajektorie läuft. Liegt der Mittelpunkt der Hinterachse auf der Trajektorie, spricht man von der perfekten Spurtreue. Grundsätzlich reichen drei Signale (der Lenkwinkel und zwei Radgeschwindigkeiten), um die Trajektorie aufzubauen. Aufgrund des Rauschens, der Fertigungsungenauigkeiten und des un stetigen Verlaufs der Signale der Pulsdrehzahlsensoren wird die Trajektorie verfälscht. Bei langen Routenzuganhängern und vor allem bei dem vorliegenden System führt das zu sporadischen Lenkbewegungen, die dann sofort nachkorrigiert werden. Ein zusätzlicher Gyrosensor löst dieses Problem und ermöglicht durch Redundanz einen sichereren Betrieb. Werte aller Sensoren werden auf Plausibilität geprüft und beim festgestellten Fehlverhalten korrigiert.

Im Rahmen eines Projektes zur Verbesserung der Spurtreue von Routenzügen wurde am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik ein Algorithmus

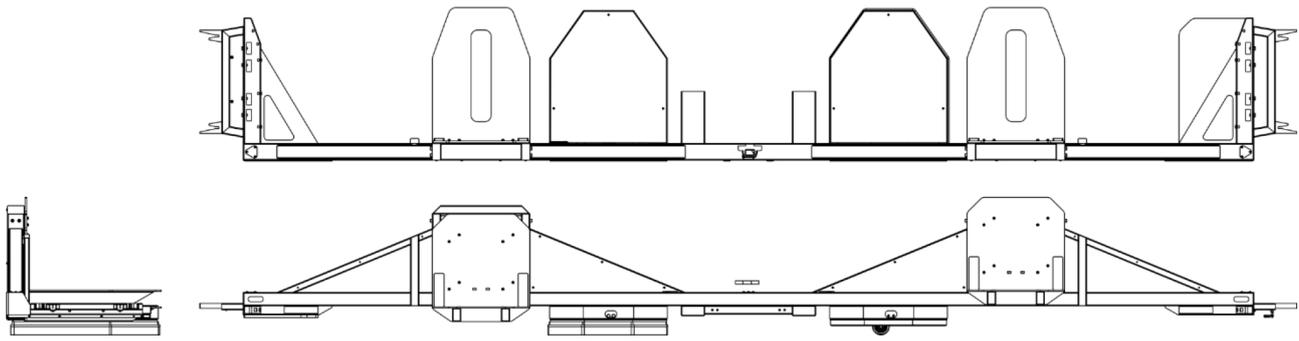


Abbildung 9: Langguttransporter zum Horizontalkommissionieren

für die autonome elektronische Lenkung von Routenzugachsen entwickelt. Dabei wird aus den Raddrehzahlen und der Radstellung die Trajektorie des Deichselpunktes geschätzt. Anschließend korrigiert der Regelalgorithmus die Radstellung insofern, dass der Mittelpunkt der Hinterachse entlang der abgespeicherten Trajektorie läuft. Liegt der Mittelpunkt der Hinterachse auf der Trajektorie, spricht man von der perfekten Spurtreue. Grundsätzlich reichen drei Signale (der Lenkwinkel und zwei Radgeschwindigkeiten), um die Trajektorie aufzubauen. Aufgrund des Rauschens, der Fertigungsungenauigkeiten und des un stetigen Verlaufs der Pulsdrehzahlsensoren wird der Verlauf der Trajektorie verfälscht. Bei langen Routenzuganhängern und vor allem bei dem vorliegenden System führt das zu sporadischen Lenkbewegungen, die dann sofort nachkorrigiert werden. Ein zusätzlicher Gyrosensor löst dieses Problem und ermöglicht durch Redundanz einen sichereren Betrieb. Werte aller Sensoren werden auf Plausibilität geprüft und beim festgestellten Fehlverhalten korrigiert.

Zur Berechnung der momentanen Position des Deichselpunktes muss der Abstand zwischen der Hinterachse und dem Koppelpunkt der Deichsel bekannt sein. Bei einem Routenzug ist dieser Abstand von den Anhängerabmessungen abhängig aber konstant. Durch die asymmetrische Ausführung des Langguttransporters hängt der Abstand der Lenkachse vom Koppelpunkt von der Seite ab, an der der Schlepper angekoppelt ist. Bei Routenzügen wird die perfekte Spurtreue angestrebt, indem die Mitte der Hinterachse stets auf der Deichseltrajektorie liegen muss. Bei einem Langgutanhänger kann so ein Verhalten jedoch störend sein. In Abbildung 6 ist ein 90° Abbiegevorgang des Langguttransporters dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass die Kurve geometriebedingt stark geschnitten wird. Der Fahrer muss somit alle Manöver sorgfältig planen, um Fußgänger und Regale nicht zu gefährden. Die Aufgabe der Regelung ist es, das Verhalten des Fahrzeugs sowohl für den Fahrer als auch für die Arbeiter logisch verständlich und vorhersehbar zu machen. Sporadische Lenkausschläge auf einer geraden Strecke, das Schneiden der Kurven und ein starkes Ausbrechen bei einem Abbiegevorgang sind unbedingt zu vermeiden, um die Akzeptanz der neuen Technik durch die Mitarbeiter nicht zu gefährden.

Zum Einstellen des gewünschten Fahrverhaltens wurde ein Punkt (Tracking Point) auf der Fahrzeuglängsachse definiert, welcher dem Deichselpunkt folgen muss. Liegt dieser Punkt zu weit vorne, bricht das Heck des Fahrzeugs aus der Kurve aus und kann die Arbeiter erfassen und verletzen (vgl. Abbildung 8). Es ist auch für den Lagerarbeiter nicht immer ersichtlich, wie viel Platz ein Fahrzeug bei diesem Lenkverhalten braucht. Ist der Tracking Point zu weit hinten, wird die Kurve geschnitten, wodurch Regale und Personen im Kurveninneren gefährdet werden können. Durch eine Fahrstudie wurde festgestellt, dass die Position des Tracking Points bei etwa drei Viertel der Fahrzeuglänge optimal ist. Sowohl der Fahrer als auch die Fußgänger konnten das Verhalten des Fahrzeugs gut einschätzen und empfanden die Spurtreue als hinreichend. Die Trajektorien der optimierten Einstellungen ist in der Abbildung 7 dargestellt.

Beim Einschalten des Fahrzeugs muss als erstes ermittelt werden, ob der Schlepper vorne oder hinten am Langguttransporter angekoppelt ist. Dieses entscheidet über die Lage der Sensoren und die Fahrtrichtung. Die Detektion erfolgt über einen Kontakt an jeder Koppelstelle, der beim Koppeln geschlossen wird. Diese Information wird aus Sicherheitsgründen dem Fahrer angezeigt. Das Fahrzeug kann entweder im automatischen oder im manuellen Modus betrieben werden. Im automatischen Zustand bei der Bewegung nach vorne wird die Trajektorie aufgebaut und nachgefahren. Es kann auch vorkommen, dass der Bediener im Gang zu weit gefahren ist und wieder rückwärtsfahren muss, um den Kommissionierungsvorgang effizient durchführen zu können. Wird die Fahrt in die entgegengesetzte Richtung festgestellt, wird die Regelung abgeschaltet und der aktuelle Lenkwinkel eingefroren. Wurde davor eine längere gerade Strecke gefahren, sind die Räder parallel zum Fahrzeug ausgerichtet. In diesem Fall kann das Fahrzeug praktisch unbegrenzt rückwärtsgefahren und manövriert werden. Die Lenkung erfolgt, wie bei einem PKW-Anhänger, über die relative Ausrichtung des Schleppfahrzeugs zur Deichsel des Anhängers. Der Anhänger kann in diesem Fahrmodus effizient durch die engen Gassen des Lagers manövriert werden, was in Fahrversuchen von einem geübten Fahrer demonstriert wurde.



Abbildung 10: Prototyp des Langguttransporters bei den ersten Fahrversuchen

Beim Rangieren in eine Gasse kann es vorkommen, dass eine zusätzliche Wendigkeit zur Feinjustierung erforderlich ist. Dafür wurde ein zusätzlicher manueller Modus implementiert. In diesem Modus wird der Lenkwinkel über ein Handrad am Schleppfahrzeug vorgegeben. Die Interaktion mit dem Bediener erfolgt über ein Touch-Panel an dem der aktuelle Zustand, die Ist-/Sollausrichtung der Räder und die Fehlermeldungen angezeigt werden. Zusätzlich können damit der Fahrmodus und die Hubstellung vorgegeben werden. Die Geschwindigkeitsvorgabe erfolgt über ein Pedal. Die Eingewöhnung an diese unübliche Steuerung hat bei einem erfahrenen Fahrer weniger als eine halbe Stunde gedauert. Daraufhin konnte das Fahrzeug auch in die Seitengänge manövriert werden, die mit den bisher verwendeten Fahrzeugverbunden aufgrund der engen Platzverhältnisse nicht benutzt wurden. Nach mehreren Testphasen wurde der einstellbare Lenkwinkel immer weiter eingeschränkt, um eine präzise und sichere Vorgabe zu ermöglichen.

Für die Optimierung des Reglerverhaltens wurde ein Hardware-in-the-Loop Teststand aufgebaut. Die Firmware des Reglers wurde erweitert, um die Vorgabe der Sensorwerte über die serielle Schnittstelle zu ermöglichen. In einem Simulink Modell wurde das Fahrverhalten des Langguttransporters simuliert, wobei der Lenkwinkel und die Bahngeschwindigkeit des Schleppers vorgegeben wurden. Während der Testphase werden anhand des Fahrzeugmodells die Werte der Puls- und Lenkwinkelsensoren bestimmt und dem Regler übergeben. Daraufhin wird der Regelalgorithmus einmal ausgeführt. Der Zustand des simulierten Lenkmotors wird über die serielle Schnittstelle zurückgegeben. Zusätzlich werden die Trajektorien bestimmt und graphisch dargestellt. Durch sukzessive Anpassungen der Regelung konnte eine gute Spurtreue mit einem sicheren Regelverhalten erreicht werden. Die Verwendung der Hardware-in-the-Loop Methodik hat die Entwicklungs-

zeit erheblich reduziert. Der Lenkregler konnte damit bereits vor der Fertigungsphase des Fahrzeugs erprobt und parametrisiert werden.

5 ERPROBUNG BEIM KUNDEN

Nach der Implementierung der zusätzlichen Kundenwünsche wurde das Fahrzeug beim Kunden im Testbetrieb über mehrere Wochen eingesetzt. Wie auch zu erwarten war, unterscheiden sich die tatsächlichen Einsatzbedingungen von denen, die in dem Pflichtenheft zusammengefasst waren. Auch wenn das Produkt iterativ und mit der Einbindung des Kunden entwickelt wurde, sollen einige Bereiche des Fahrzeugs angepasst werden, bevor die Technik in den regelmäßigen Einsatz kommen wird.

Im Folgenden wird erläutert, welche der in der Konzeptphase getroffenen Annahmen sich im Nachhinein als falsch erwiesen haben. Die neuen Langguttransporter sollten zwei Niederhubwagen in Tandemkonfiguration ersetzen. Am Anfang des Projektes wurde bezweifelt, dass die Wendigkeit von zwei separaten Fahrzeugen erreicht werden kann. Aus diesem Grund wurde festgeschrieben, dass der Langguttransporter von beiden Seiten mittels einer Schnellkupplung angekoppelt werden können soll. Nach dem Erreichen der richtigen Position vor dem Regal in einem Seitengang und dem erfolgten Kommissionieren sollte der Schlepper schnell von der anderen Seite angekoppelt werden und den Anhänger in den Hauptgang ziehen. Dadurch würde der Langguttransporter stets gezogen werden, wodurch sich die Sicht in den Gang signifikant verbessern würde. Eine Schnellkupplung sollte dabei die Umschlagsleistung steigern, da zum Koppeln weder der Fahrer noch der Beifahrer den Schlepper verlassen müssen.

Die Konstruktion der Kupplung erwies sich allerdings schwieriger als gedacht. Die Bodenebenheiten haben

dazu geführt, dass die Kupplung große Bewegungen des Anhängers ausgleichen muss, zudem muss die elektrische Verbindung zu jedem Zeitpunkt sicher funktionieren. Obwohl für die elektrische Kupplung gefederten Kontaktstifte in Kombination mit einer in zwei Dimensionen gefederten Aufhängung verwendet wurden, verstellte sich die Kupplung nach einigen Betriebsstunden und musste neu ausgerichtet werden. Aufgrund des geringen Rollwiderstandes der verwendeten Räder, konnte der Langguttransporter mit einer relativ geringen Kraft auch per Hand verfahren werden. Diese Möglichkeit wurde vom Kunden zwar sehr begrüßt, führte jedoch beim zu schnellen Anfahren zum Wegrollen des Transporters während des Koppelvorgangs, was den Vorgang insgesamt verlängerte. Aufgrund der engen Platzverhältnisse im Bereich der Kupplung musste diese sehr flach konstruiert werden. Damit der Anhänger sich während der Fahrt nicht löst, wurden zwei elektrisch angetriebenen Haken verwendet. Diese ermöglichen zwar einen sicheren Betrieb, verlängern durch die notwendigen Verriegelungs- und Entriegelungsvorgänge die Spielzeit zusätzlich.

Bei der Erprobung wurde festgestellt, dass die Fahrer den Langguttransporter nur wenige Male pro Schicht umgekoppelt haben, was auf die sehr gute Wendigkeit des Langguttransporters im manuellen Modus zurückzuführen ist. Insgesamt konnten alle Manöver nachgefahren werden, die bei einer Tandemfahrt möglich sind. Auch das Herauschieben des Anhängers in den Hauptgang stellte keine Probleme dar und war deutlich effizienter als der ursprünglich vorgesehene Umkoppelvorgang. Abgesehen davon mussten die Fahrer zum Kommissionieren der Langgüter das Fahrzeug verlassen, wodurch das manuelle Herstellen der elektrischen Verbindung kaum Zeit in Anspruch genommen hätte. Eine feste Deichsel in Kombination mit einem Schnellstecker, die für wenige Koppelvorgänge pro Schicht ausgelegt sind, würden bei den Serienfahrzeugen für mehr Sicherheit sorgen und die Komplexität des Systems verringern. Eine andere Anforderung an den Langguttransporter aus dem Lastenheft war die seitliche Koppelstelle, durch die das Fahrzeug quer verfahren werden sollte. Diese Fahrweise wurde von den Bedienern praktisch nie benutzt. Nach mehreren Wochen im Testbetrieb wurde die Entscheidung getroffen, die Kupplungen neu zu gestalten und das Fahrzeug ins Drei-Schicht-Betrieb aufzunehmen. Am Ende der Testphase wird der Kunde entscheiden, ob er seine bestehende Fahrzeugflotte durch den neuartigen Langguttransporter erweitern wird.

6 AUSBLICK

Die intralogistische Beförderung vom Langgut stellt eine Herausforderung dar. Zum Kommissioniereinsatz mit hoher Umschlagsleistung wurde im Rahmen dieses Projektes ein Langguttransporter entwickelt, mit dem bei gleichbleibender Pickleistung ein hochqualifizierter Fahrer eingespart werden kann. Somit können saisonale Schwankungen effizienter ausgeglichen werden. Mit dem weiteren Umstieg auf diese Fahrzeugkombination kann die Anzahl der Fahrzeuge im Lager reduziert und das Batteriemangement vereinfacht werden. Der Betrieb wird zudem sicherer. In dem Projekt wurde die agile Entwicklungsphilosophie erfolgreich eingesetzt, wodurch die Realisierung eines völlig neuartigen Transportfahrzeugtyps trotz eines nur kleinen Entwicklungsteams innerhalb von nur neun Monaten ermöglicht wurde. Aufbauend auf der bestehenden Hardware wurde der Regelalgorithmus aus dem Routenzugbereich angepasst und für bessere Handhabung erweitert. Für eine intuitive Bedienung wurden mehrere Betriebsmodi implementiert, die durch ihre jeweiligen Stärken alle relevanten Fahrmanöver abdecken.

Nach der Anpassung der Kupplung wird ein Testbetrieb vorgenommen, bei dem die neue Lösung im direkten Vergleich zur bestehenden Technik antreten wird. Die Erkenntnisse dieser Studie werden in die strategische Unternehmensplanung einbezogen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] S. Ulrich, R. Bruns und K. Krivenkov, Gleisloser routenzug, EP3251921B1, European Patent Office, 2016.
- [2] S. Ulrich, R. Bruns und K. Krivenkov, „Simulationsgestützte Entwicklung eines Lenkkonzeptes für Routenzüge,“ *Logistics Journal: Proceedings*, 2014.
- [3] S. Ulrich, B. Piepenburg, R. Bruns und K. Krivenkov, „Simulationsgestützte Entwicklung eines Lenkkonzeptes für Routenzüge,“ *Logistics Journal: Proceedings*, 2013.

Dr.-Ing. Sergey Stepanyuk. hat Wirtschaftsingenieurwesen an der Leibniz Universität in Hannover studiert und ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik, Helmut-Schmidt-Universität.

Dr.-Ing. Stephan Ulrich hat Physikalische Ingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Berlin studiert und ist seit 2006 am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik an der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg tätig.

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.

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

Telefon (R. Bruns): +49 40 / 65 41 – 28 55
E-Mail: Rainer.Bruns@hsu-hh.de

Telefon (S. Stepanyuk): +49 40 / 65 41 – 3639
E-Mail: sergey.stepanyuk@hsu-hh.de