

Leistungsanalyse eines vorausschauenden, liniengeführten, fahrerlosen Transportfahrzeugs

Performance analysis of a foresighted line guidance system
for autonomous transport vehicles

Jonathan Dziedzitz
Maximilian Hochstein
Kai Furmans

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Die fahrtechnischen Leistungen liniengeführter, fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) sind schwierig zu vergleichen und zu bewerten. In dieser Veröffentlichung sollen empirisch ermittelte Leistungsdaten eines kamerabasierten, liniengeführten FTF vorgestellt und interpretiert werden. Die entwickelte Teststrecke stellt eine repräsentative Kombination aus Geraden, Kurven und einem Hochgeschwindigkeitsbereich dar. Als Gütekriterien werden zum einen die Rundenzeiten des Fahrzeugs und zum anderen die Abweichungen von der Spur, bei über 300 Testfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeitseinstellungen, herangezogen und ausgewertet.

[Schlüsselwörter: *Linienführungssystem, vorausschauend, fahrerlose Transportfahrzeuge, Fahrversuche*]

The performance of a line based autonomous guided vehicle (AGV) is often hard to measure and hard to compare. In this paper, the performance of the vehicle is measured on a representative test track, which is a combination of curves, straights and a special highway. The testing criteria are the time to complete a full round as well as the deviation of the vehicle in respect to the line. Over 300 tests with different velocity settings were performed and evaluated.

[Keywords: *line guidance system, foresight, autonomous transport vehicle, driving tests*]

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Das industrielle Interesse an der Verwendung fahrerloser Transportsystemen (FTS) in der Intralogistik ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Viele neue Anbieter bieten fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) mit unterschiedlicher Sensorik und unterschiedlichem Funktionsumfang an. Kostengünstige Fahrzeuge verzichten überwiegend auf komplexe Funktionen, wie beispielsweise eine Lokalisierung der Fahrzeuge, das Erkennen von Hindernissen, dezentrale Auftragsplanung oder interaktive

Kommunikation mit dem Kunden. Die Verwendung leistungsstarker Sensorik erhöht den Preis der Fahrzeuge erheblich. Aus diesem Grund werden häufig günstigere, spurgeführte Fahrzeuge eingesetzt, die allerdings in Folge des eingeschränkten Sichtfelds nach unten deutlich an Flexibilität und Reaktionsfähigkeit auf ihre Umwelt verlieren.



Abbildung 1. Das Versuchsfahrzeug mit einem Drei-Räder-Aufbau und nach vorne geneigter Kamera

Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wird bereits seit 2014 gemeinsam mit der Firma Imetron Gesellschaft für industrielle Mechatronik mbH an einem autonomen Transportfahrzeug geforscht, das trotz kostengünstiger Sensorik, aufgrund leistungsfähiger Algorithmen, komplexe Situationen meistern kann. Die Projektförderung erfolgt durch das Zentrale Innovationsprojekt Mittelstand (ZIM). Im Gegensatz zu herkömmlichen Linienfolgesystemen, die eine senkrecht nach unten gerichtete Kamera verwenden, wird eine in Fahrtrichtung gerichtete, „vorausschauende“ Kamera verwendet. Dies erlaubt das Fahren neben der Linie und ein frühzeitiges Erkennen und Reagieren auf Kurven oder Kreuzungen. Zusätzlich ist es möglich, da die Spur mit Hilfe einer Bildverarbeitung ausgewertet wird, Barcodes am Boden zu erkennen und somit das Fahrzeug mit zusätzlichen Informationen zu versorgen.

Die Veröffentlichung dient der Bereitstellung von Kenndaten, in Bezug auf mögliche Fahrgeschwindigkeiten des FTF, dem Verhalten in Kurven und auf Hochgeschwindigkeitsabschnitten. Es soll ebenfalls auf die Möglichkeit der Zeiteinsparung, durch die Verwendung von Barcodes, für abgesperrte Streckenbereiche (hier „Hochgeschwindigkeitsabschnitte“) eingegangen werden.

2 GRUNDLAGEN SPURGEFÜHRTER SYSTEME

Spurgeführte Systeme zählen im autonomen, intralogistischen Warentransport zu den gängigsten und etabliertesten Systemen. Neben einer Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen gehört die optische Spurführung [Ull-11], mit Hilfe einer auf dem Boden aufgetragenen Linie, zu den am meisten verbreiteten.

Gemein haben alle Systeme die Ausrichtung des Sensors, mit dem die Spur detektiert wird. So ist der Sensor immer, wie in Abbildung 2 dargestellt, senkrecht nach unten auf den Hallenboden gerichtet. Bei der optischen Spurführung versucht das System während der Fahrt die Linie immer im Sichtfeldmittelpunkt zu halten.



Abbildung 2. Spurführungssystem, Position Guided Vision PGV, auf schwarzer Spur [Pep]

Ein optisch spurgeführtes System ist in der Regel so aufgebaut, dass eine Kamera mit Auswerteeinheit an der Front und/oder am Heck eines FTF montiert wird. Eine zusätzliche Ausleuchtung des Sichtfeldes minimiert den Einfluss von Fremdlicht. Bewegt sich die Linie während der Fahrt, bspw. auf Grund einer Kurve, aus dem Mittelpunkt des Sichtfeldes heraus, wird der Versatz durch ein Gegensteuern über die Motoren wieder ausgeglichen.

3 ANSATZ VORAUSSCHAUENDE SPURFÜHRUNG

Der Ansatz einer vorausschauenden, kamerabasierten Spurführung, gründet auf einer Kameraperspektive, die ungleich senkrecht auf den Boden, sondern nach vorne gerichtet ist [Hoc-15]. Neben Nachteilen in Form von negativen Fremdlichteinflüssen und Reflexionen auf dem Hallenboden, bietet diese Art der Spurführung auch eine

Vielzahl von Vorteilen. So kann beispielsweise auf geraden Streckenabschnitten mit höherer Geschwindigkeit gefahren werden, da Kurven frühzeitig erkannt werden und die Geschwindigkeit vor dem Kurveneintritt gedrosselt werden kann. Ein anderer Vorteil stellt das Fahren neben der Strecke dar. Auf Grund des breiteren Sichtfeldes ist ein Fahrzeug in der Lage, wenn auch nur in eingeschränktem Maß, neben der Spur zu fahren, ohne diese aus dem Sichtfeld zu verlieren. Befinden sich Hindernisse in Spurnähe, die ein normales spurgeführtes System dazu zwingen würden stehen zu bleiben, eröffnet sich durch eine nach vorne gerichtete Kamera die Möglichkeit, diese zu umfahren. Ein weiterer Vorteil, der aus dem vergrößerten Sichtfeld resultiert, ist der kleinere Einfluss einer verschmutzten oder fehlenden Spur. So konnte bereits in nicht repräsentativen Tests gezeigt werden, dass Spurlücken bis zu einer Länge von 20 cm passiert werden können.

4 VERSUCHSAUFBAU

Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie die Versuche aufgebaut sind, welche Eigenschaften das Streckenlayout hat, welche Randbedingungen vorherrschten und mit welchen Geschwindigkeiten die Testfahrten durchgeführt wurden.

4.1 TESTPARCOURS

Der Parcours mit dem in Abbildung 4 dargestellten Layout, wurde auf der Versuchsfläche des IFL angebracht. Das Layout besteht aus drei rechtwinkligen Kurven mit den Radien 0,7 m und 1,0 m und einer 270° Kehre mit einem Radius von 1,0 m. Erweitert wurde das Layout durch eine S-Kurve mit den jeweiligen Radien von 0,7 m. Verbunden wurden die Kurven durch Geraden unterschiedlicher Länge zwischen 4,5 m und 10 m.

Der Hallenboden besteht aus grauem, versiegeltem Beton. Als Linie wurde ein weißes, handelsübliches, lichtundurchlässiges Isolierband mit einer Breite von 19 mm verwendet.



Abbildung 3. Hallenboden mit weißem Isolierband als optische Spur

Das Streckenlayout wurde in einem ersten Schritt vermessen. Anschließend wurde das Isolierband händisch auf dem Hallenboden aufgebracht.

Die längste Gerade von 10 m stellt eine gesonderte Verbindungsstrecke dar, da sie in einigen der Versuche als

Hochgeschwindigkeitsstrecke verwendet wurde, um eine Verbindung zwischen zwei Hallenbereichen zu simulieren. Die Hochgeschwindigkeitsfahrten wurden mit Hilfe von Barcodes initialisiert. Nach einer definierten Strecke von 9 Metern, wurde die Hochgeschwindigkeitsfahrt abgebrochen und das Fahrzeug wieder in den normalen Fahrmodus versetzt.

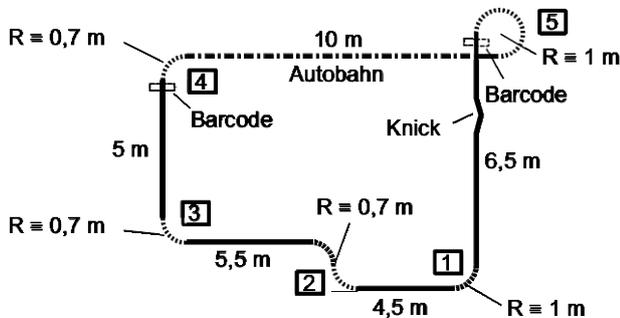


Abbildung 4. Testparcours mit Kurvennummerierung, Barcodeplatzierung und Hochgeschwindigkeitsstrecke

4.2 FAHRZEUG

Für die Tests wird auf ein bestehendes Fahrzeug zurückgegriffen [Hoc-15]. Als Fahrwerk dient ein Radseitenantrieb mit einer einzelnen, drehbar gelagerten Bockrolle am Heck (siehe Abbildung 1).

Die Antriebsräder sind von der Firma Blickle bezogen und haben eine Belaghärte von 75° Shore A aufzuweisen. Gemäß Abbildung 5 haben sie einen Durchmesser von 150 mm. Das Fahrzeug hat eine Spurweite von 355 mm und einen Radstand von 500 mm. Die Kamera zur Linienerkennung wurde in einer Höhe von 176 mm angebracht und ist in einem Winkel von 27° Richtung Hallenboden geneigt. Aus Sicherheitsgründen wurde das Fahrzeug mit einem Laserscanner zur Kollisionsvermeidung ausgestattet. Das Schutzfeld verlief um die Front- und Seitenpartie des Fahrzeuges in einem Abstand von 100 mm.

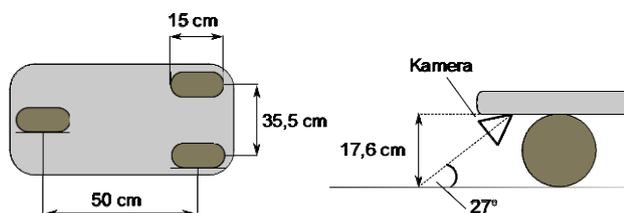


Abbildung 5. Fahrzeug- und Kamerageometrie

Die Bildverarbeitung erfolgte mit Hilfe eines Computers mit einem i5 Prozessor der Firma Intel. Zur Reduktion von Reflexionen auf dem Hallenboden wurde vor der Kameralinse ein Polarisationsfilter angebracht.

4.3 RANDBEDINGUNGEN

Die Versuche wurden am Tag durchgeführt. Die Lichtverhältnisse entsprechen zum größten Teil denen in

Abbildung 1 dargestellten. Es gab keine direkte Sonneneinstrahlung. Vor jeder Versuchsreihe wurde der Hallenboden feucht gewischt und die Räder gereinigt. Ziel war es, vor jeder neuen Versuchsreihe annähernd gleiche Bedingungen zu schaffen.

4.4 KONZEPT

Durchgeführt wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die Strecke wurde im Uhrzeigersinn (CW) und gegen den Uhrzeigersinn (CCW) sowie mit und ohne Hochgeschwindigkeitsfahrten befahren. Folgende Versuchsreihen wurden dabei durchgeführt und aufgezeichnet:

- 0,6 m/s CW
- 0,6 m/s CCW
- 0,6 m/s CW, Hochgeschwindigkeit
- 1,0 m/s CW, Hochgeschwindigkeit
- 1,0 m/s CCW, Hochgeschwindigkeit
- 1,2 m/s CW
- 1,2 m/s CCW
- 1,2 m/s CW, Hochgeschwindigkeit
- 1,2 m/s CCW, Hochgeschwindigkeit
- 1,5 m/s CW
- 1,5 m/s CCW

4.5 GESCHWINDIGKEITSREGELUNG

Zu Beginn der Versuche wurde eine Basisgeschwindigkeit von 0,6 m/s festgelegt. Diese ergab sich aus der maximal möglich Kurvengeschwindigkeit in der engsten Kurve, abzüglich einer Sicherheit von 0,05 m/s. Die Basisgeschwindigkeit stellt dabei die Geschwindigkeit dar, mit der das Versuchsfahrzeug die Strecke konstant durchfahren kann, ohne dabei die Geschwindigkeit zu verändern und ohne, auch in den engen Kurven, auf Grund von Traktionsproblemen, von der Strecke abzukommen.

Bei den Versuchen wurden, anstelle von konstanten Geschwindigkeiten, unterschiedliche Sollgeschwindigkeiten gewählt. Durch die bereits in Kapitel 3 erwähnten Vorteile des vorausschauenden Fahrens, kann eine Kurve frühzeitig erkannt werden und ein schnelleres Fahren auf geraden Strecken ermöglicht werden. Die Sollgeschwindigkeit ist wiederum die maximale Geschwindigkeit, die auf einer Geraden gefahren werden darf. Die Kurvengeschwindigkeit wurde unabhängig vom Radius auf die Basisgeschwindigkeit (0,6 m/s) festgelegt. Wird eine Kurve

erkannt, verzögert das Fahrzeug in solchem Maß, dass bei Kurveneintritt die Basisgeschwindigkeit erreicht ist.

Eine Ausnahme bildet dabei die Hochgeschwindigkeitsstrecke. Wird der korrekte Barcode detektiert, beschleunigt das Fahrzeug auf der nächsten Geraden auf 2 m/s und hält die Geschwindigkeit, bis eine definierte Strecke von 9 Metern zurückgelegt wurde. Anschließend verzögert das Fahrzeug wieder bis zum Erreichen der Sollgeschwindigkeit.

4.6 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Versuchsreihen zu je 30 - 32 Versuchen. Zwischen den einzelnen Reihen wurden die Versuchsfläche und die Fahrzeugreifen mit Wasser gereinigt. Das Fahrzeug wurde unabhängig von der Ladekapazität in zeitlich regelmäßigen Abständen geladen. Zur Aufzeichnung des Fahrverhaltens wurde eine unabhängige Kamera oberhalb des Laserscanners fest montiert. Das Sichtfeld der Kamera wurde hierbei senkrecht nach unten gerichtet. Gefilmt wurde jeweils eine gesamte Versuchsreihe.

4.7 AUSWERTUNG

Die Abweichung des Fahrzeugs zur Linie wurde mit Hilfe einer zusätzlichen, nach unten gerichteten Kamera aufgezeichnet. Hierbei wurde mit einer Auswertegeschwindigkeit von 30 Hz in einem selbst entwickelten Offlineverfahren die Abweichung zur Linie bestimmt.

Jedes aufgezeichnete Farbbild wird zunächst in ein Graustufen Bild umgewandelt und durch einen Gauss-Filter, mit einer Filtermaske von 20x20 Pixeln, weichgezeichnet. Anschließend wird das Intensitätsmaximum der Linie in Pixelkoordinaten bestimmt, gefiltert und in Zentimeter umgerechnet.

5 TESTERGEBNISSE

Die erhobenen Testdaten (vgl. Kapitel 4) sollen nun für einen anschaulichen Vergleich herangezogen werden. Da keine erheblichen Unterschiede zwischen einer Testfahrt im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn festzustellen waren (< 2 %), werden, mit dem Ziel eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, fünf Hauptgeschwindigkeiten bei einer Fahrt im Uhrzeigersinn ausgewertet:

1. 0,6 m/s ohne Barcodeerkennung
2. 0,6 m/s mit Barcodeerkennung
3. 1,0 m/s mit Barcodeerkennung
4. 1,2 m/s mit Barcodeerkennung
5. 1,5 m/s ohne Barcodeerkennung

5.1 DATENINTERPRETATION

Über die Tests hinweg lassen sich alle Daten auf zwei Werte zusammenführen. Die Abweichung von der Linie und die Zeit, die das Fahrzeug für eine Runde benötigt. In einem ersten Schritt wurde ein Vergleichswert ermittelt. Gemäß Kapitel 4.5 wurde dieser als Basisgeschwindigkeit festgelegt, die die maximal fahrbare Geschwindigkeit beschreibt, die das Fahrzeug fahren kann, ohne von der Strecke abzukommen.

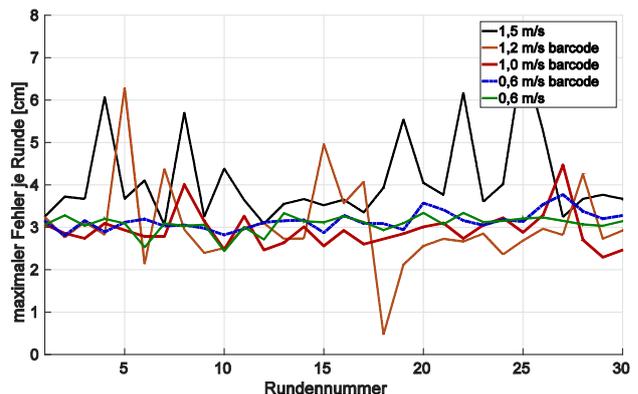


Abbildung 6. Verlauf des maximalen Fehlers je Runde für fünf unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten

Anschließend wurden die Versuchsreihen mit unterschiedlichen Sollgeschwindigkeiten wiederholt und ausgewertet. In Abbildung 6 ist die maximale Abweichung für fünf verschiedene Geschwindigkeiten über 30 Runden hinweg dargestellt.

Zu erkennen ist, dass mit zunehmender Geschwindigkeit auch die Fehleranfälligkeit bzgl. Abweichungen von der Linie ansteigen. Während bei einer Geschwindigkeit von 0,6 m/s der Fehler innerhalb von 30 Runden einen Wert von 3,8 cm nicht übersteigt, stieg er bei 1,5 m/s auf über 6,5 cm an. Zu beachten ist, dass bei Geschwindigkeiten bis zu 1 m/s die meisten Abweichungen nicht auf ein falsches Erkennen der Spur zurückzuführen ist, sondern durch das Schneiden der Kurven. Auf Grund der engen Kurven ist ein Schneiden zwingend erforderlich, damit die Linie sich nicht außerhalb des Sichtbereichs der Kamera bewegt. In Abbildung 9 sind die Abweichungen aller 30 Runden bei einer Geschwindigkeit von 1,0 m/s wiedergegeben. Zu erkennen ist, dass beim Schneiden der S-Kurve die größte Abweichung auftritt.

Da auch bei höheren Sollgeschwindigkeiten die Kurvengeschwindigkeit konstant bei 0,6 m/s liegt, sind die größeren Fehler nicht mehr auf ein Schneiden der Kurven zurückzuführen.

Ein ähnlicher Verlauf ist auch in Abbildung 7 zu erkennen. Analysiert wurden die Standardabweichungen, die in den einzelnen Runden bei unterschiedlichen Sollgeschwindigkeiten aufgetreten sind. Während bei einer Geschwindigkeit von 0,6 m/s die Abweichung in keiner der

Runden über einen Wert von 1 cm hinausgegangen ist, wurden bei der hohen Sollgeschwindigkeit von 1,5 m/s in einer Runde Abweichungen von bis zu 3 cm ermittelt.

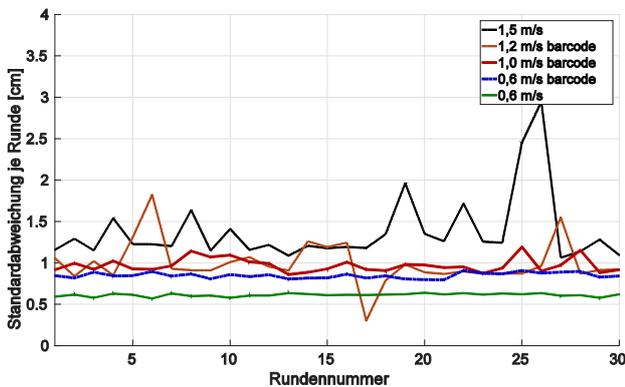


Abbildung 7. Verlauf der Standardabweichung je Runde unterschiedlicher Fahrzeuggeschwindigkeiten

Eine Gegenüberstellung der Rundenzeit zur Abweichung von der Strecke findet sich in Abbildung 8 wieder. Dabei wurde die kumulative Fehlersumme, für fünf verschiedene Geschwindigkeiten über die durchschnittliche Rundenzeit aufgetragen.

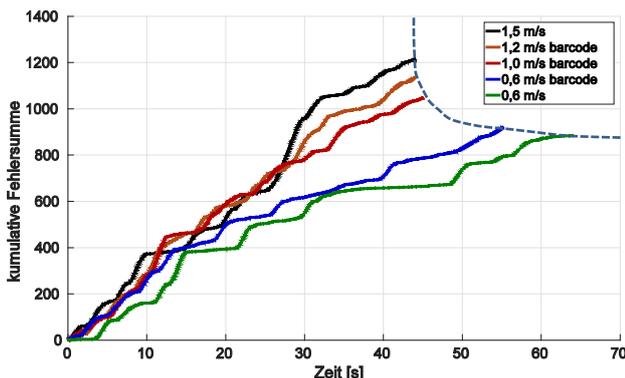


Abbildung 8. Kumulative Fehlersumme für fünf unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten über deren durchschnittlichen Rundenzeiten

Betrachtet man den Querversatz $e(t)$ des Fahrzeugs zur Linie nicht als Absolutwert zu jedem Zeitpunkt t , sondern summiert diesen über den gesamten Zeitverlauf auf, erhält man die kumulative Fehlersumme $e_k(t)$:

$$e_k(t + 1) = e_k(t) + e(t)$$

Es ist zu erkennen, dass bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 0,6 m/s ohne Barcode (grüne Kurve), die Rundenzeit mit 65 Sekunden zwar am höchsten ist, die kumulative Fehlersumme jedoch am geringsten. Durch die Hinzunahme einer Barcodeerkennung (blaue Linie) und somit einer erhöhten Geschwindigkeit von 2 m/s auf dem Hochgeschwindigkeitsabschnitt (vergl. Abbildung 9), ist eine deutliche Reduzierung der Rundenzeit (18 %) bei nahezu gleichbleibender kumulativer Fehlersumme zu beobachten. Erhöht man die Fahrzeuggeschwindigkeit weiter auf 1 m/s (rote Kurve) und verwendet weiterhin eine

Barcodeerkennung, wird eine Reduzierung der Rundenzeit von 22% bei einer Verschlechterung der kumulativen Fehlersumme um 14 % deutlich. Vergleicht man nun Geschwindigkeitsgewinn mit dem Genauigkeitsverlust, in Form der kumulativen Fehlersumme, mit Hilfe eines Faktors

$$f_{v1 \rightarrow v2} = \frac{\text{Geschwindigkeitsgewinn [\%]}}{\text{Genauigkeitsverlust [\%]}}$$

ergibt sich folgende Tabelle:

Von/Nach [m/s]	1,5*	1,2	1,0	0,6	0,6*
1,5*					
1,2	0,08				
1,0	0,09	0,26			
0,6	0,44	1,40	1,57		
0,6*	0,58	1,42	1,53	1,38	

Tabelle 1. Faktorvergleich des durchschnittlichen Geschwindigkeitsgewinns und durchschnittlichem Genauigkeitsverlusts, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Mit * gekennzeichnete Geschwindigkeiten sind ohne Barcodeerkennung und somit ohne Hochgeschwindigkeitsstrecke

Aus Abbildung 8 sowie Tabelle 1 geht hervor, dass der größte Leistungszuwachs gegenüber der Basisgeschwindigkeit bei 1,0 m/s liegt ($f = 1,57$ und $f=1,53$). Eine weitere Erhöhung der Sollgeschwindigkeit führt auf dem getesteten Parcours nur noch in sehr geringem Maße zu einer Verkürzung der Rundenzeit und somit nur zu einer geringfügig höheren Durchschnittsgeschwindigkeit, während die Fehleranfälligkeit deutlich zunimmt. Es lässt sich ebenfalls aus Abbildung 8 abschätzen, dass eine Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 0,9 m/s den besten Kompromiss aus Fahrzeuggeschwindigkeit und Linientreue darstellt (gestrichelte Kurve).

Abbildung 10 zeigt, in einem Ausschnitt aus Abbildung 9, die einzelnen Fahrversuche bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 1 m/s, die auf dem Hochgeschwindigkeitsabschnitt zwischen Kurve 4 und Kurve 5 (Abbildung 9) auf 2 m/s erhöht wird. Da der Barcode bereits vor dem Einfahren in die Kurve gelesen wurde, beschleunigt das Fahrzeug, sobald es Kurve 4 verlässt. Bei Sekunde 28 sind nahezu alle Fahrversuche mit einem Fehler von weniger als 0,5 Zentimeter Abweichung von der Linie entfernt.

Während der Beschleunigungsphase des Fahrzeugs, von 0,6 m/s Kurvengeschwindigkeit auf 2 m/s Hochgeschwindigkeit, Sekunde 28 – Sekunde 30, wächst die Abweichung kontinuierlich bis zu einem Maximalfehler von 2,5 Zentimetern. Der Fehler bleibt hier, auf Grund nicht idealer Regeleinstellungen annähernd konstant, bis die Abbremsphase des Fahrzeugs, in Sekunde 31, einsetzt. Die Abweichung des Fahrzeugs zur Linie beträgt hier erneut unter 0,5 Zentimeter, bevor es in Kurve 5 einfährt.

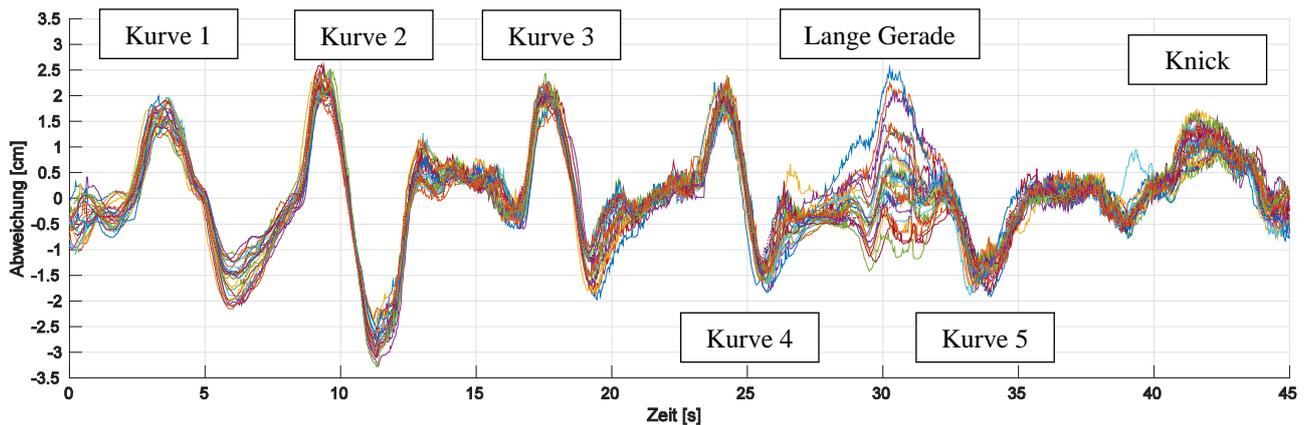


Abbildung 9. Abweichungen von der Linie bei einer Basisgeschwindigkeit 1,0 m/s bei 30 Runden (CW)

Die Abweichungen auf dem Hochgeschwindigkeitsabschnitt sind in unterschiedliche Richtungen gestreut. Je nach Ausgangsposition vor der Beschleunigungsphase, zieht das Fahrzeug nach links oder rechts. Ab einer bestimmten Abweichung findet sich ein Regelgleichgewicht zwischen den Regelparametern [Hoc-15]. Hier wäre eine Deckelung eines Regelparameters denkbar, um die Ergebnisse weiter zu verbessern.

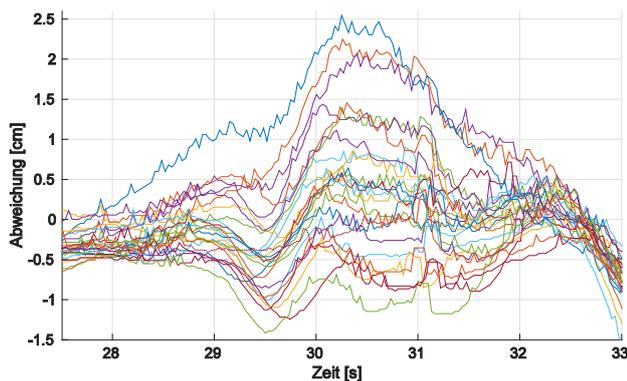


Abbildung 10. Hochgeschwindigkeitsabschnitt mit einer Maximalgeschwindigkeit von 2,0 m/s über 30 Runden (CW) bei einer Basisgeschwindigkeit von 1,0 m/s

Eine besonders schwierige Situation stellt die S-Kurve (Kurve 2 des Testparcours, Abbildung 9) mit einem Radius von nur 0,7 Meter für das Fahrzeug dar. In Abbildung 11 ist erneut ein Ausschnitt aus Abbildung 9 bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 1 m/s zu sehen.

In der ersten Hälfte der S-Kurve verlässt das Fahrzeug die Linie nur bis zu einer Abweichung von 2,5 Zentimetern. Auf der zweiten Hälfte hingegen, wird die Abweichung bis zu 3 Zentimeter groß. Dies lässt sich durch den engen Kurvenradius erklären, da das Fahrzeug sonst die zweite Hälfte aus dem Sichtfeld verlieren würde. Besonders auffällig ist der gerade Abschnitt zwischen beiden Kurvenhälften: Die Abweichung der einzelnen Testfahrten zeigt hier nahezu keine Streuung.

Vergleicht man Abbildung 10 (Sekunde 28) mit Abbildung 11 (Sekunde 10,5) stellen beide Zeitpunkte einen

Geradenabschnitt direkt nach dem Durchfahren einer Kurve dar. In beiden Abbildungen ist eine maximale Abweichung von 0,5 cm zu beobachten. Das Fahrzeug fährt somit unmittelbar nach Kurven (Geschwindigkeit 0,6 m/s) nahezu fehlerfrei auf die darauffolgende Gerade. Hieraus kann gefolgert werden, dass für eine Geschwindigkeit von 0,6 m/s annähernd ideale Regelparameter gefunden wurden und für die in Abbildung 10 sichtbaren Abweichungen bei höheren Geschwindigkeiten (Hochgeschwindigkeitsabschnitt) noch Verbesserungspotential vorliegt.

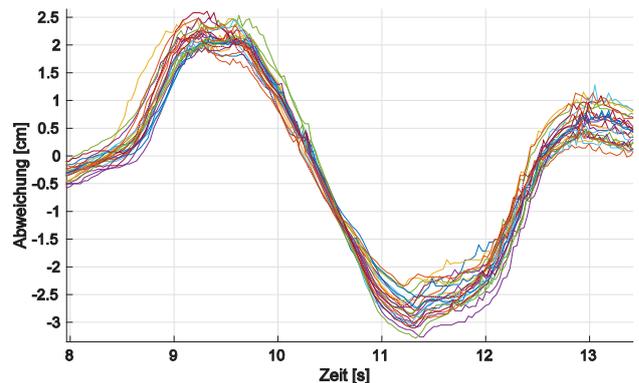


Abbildung 11. Rechtskurve mit darauffolgender Linkskurve bei einer Basisgeschwindigkeit von 1,0 m/s (CW)

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wird gezeigt, dass durch veränderbare Geschwindigkeiten auf Geraden, die Durchschnittsgeschwindigkeit deutlich erhöht werden kann. Mit einer Erhöhung der Sollgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird jedoch die Fehlergröße als auch die Fehlerhäufigkeit erhöht.

Durch die Verwendung einer Barcodeerkennung in Kombination mit einem Hochgeschwindigkeitsabschnitt kann die durchschnittliche Geschwindigkeit weiter gesteigert werden, ohne die Fahrzeugabweichung zur Linie stark zu beeinflussen. Es wurde herausgefunden, dass die Hochgeschwindigkeitsstrecke einen geringen Einfluss auf das Fahrverhalten hat. Durch Regeleinstellungen kann dieser in Zukunft noch weiter minimiert werden. Zusätz-

lich ist eine Anpassung der Kurvengeschwindigkeiten an den jeweiligen Kurvenradius denkbar und somit eine weitere Geschwindigkeitssteigerung möglich. Mit der in Abbildung 8 dargestellten kumulativen Fehlersumme, in Verbindung mit dem vorgestellten Bewertungsverfahren, ist es zudem möglich eine hohe Fahrzeuggeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Linientreue abzuschätzen und Geschwindigkeitssteigerungen zu bewerten.

Da das Fahrzeug in der Lage ist, neben der Linie zu fahren, sind Fahrversuche mit einem neben der Linie fahrenden Fahrzeug durchaus sinnvoll. Der Vorteil, Übergabestellen neben der Linie anfahren zu können, ohne die Strecke für andere Fahrzeuge während der Warenübergabe zu versperren, bietet vor allem bei stark frequentierten Streckenabschnitten weitere Vorteile. Da die Linie mit Hilfe einer Kamera detektiert wird, kann eine Navigation jenseits der Linie bis zu einem gewissen Grad mit Hilfe einer Hinderniserkennung weiter ausgebaut werden. Das Fahrzeug könnte in Zukunft in der Lage sein, Hindernissen oder anderen Fahrzeugen in begrenztem Maße auszuweichen.

LITERATUR

- [Hoc-15] Hochstein M, Dziedzitz D, Göbgen J, Furmans K (2015). Alternatives Linienführungssystem für autonome, fahrerlose Transportsysteme. *Logistics Journal*, Vol. 2015.
- [Ull-11] Ullrich, Günter (2011): *Fahrerlose Transportsysteme: Die FTS-Fibel mit Praxisanwendungen, zur Technik, für die Planung*, VIEWEG+TEUBNER, S. 75ff.
- [Pep] Pepperl+Fuchs GmbH (2015): *POSITION GUIDED VISION (PGV)* Part. No. 262497 06/16 01

M. Sc. Jonathan Dziedzitz*, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Jonathan Dziedzitz studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Im Januar 2016 trat er seine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme an. In der Abteilung Robotik und Assistenzsysteme liegen seine Forschungsschwerpunkte in den Bereichen autonomes Fahren, Lokalisierung und Remote Assistance.

Tel.: +49 (0)721/608-48670,
E-Mail: Jonathan.Dziedzitz@kit.edu

Dipl.-Ing. Maximilian Hochstein*, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Maximilian Hochstein studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Im Januar 2013 trat er seine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme an. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Steuerungstechnik und der Ortung von FTF.

Tel.: +49 (0)721/608-48665,
E-Mail: Maximilian.Hochstein@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Professor Dr.-Ing. Kai Furmans war nach seinem Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe von 1988 bis 1996 am Institut für Fördertechnik tätig. Seine Promotion schloss er im April 1992 zum Dr.-Ing. ab. Nach einer Postdoktorandenzeit in den USA arbeitete er zwischen 1996 bis 2003 für die Robert Bosch GmbH. Danach kehrte er ans Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme zurück und ist seit Oktober 2005 Institutsleiter. Schwerpunkte seiner Arbeiten sind Materialflussplanung in Bediensystemnetzwerken.

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,
Tel.: +49 (0)721/608-48600,
E-Mail: Kai.Furmans@kit.edu

* die gekennzeichneten Autoren haben zu gleichen Teilen zur Entstehung der Veröffentlichung beigetragen