

AUTOREN



Timm Sauer, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter im Labor für
Simulation, Steuerung
und Regelung der
TH Aschaffenburg
in Aschaffenburg.



Manuel Gorks, M. Eng.
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter im Labor für
Simulation, Steuerung
und Regelung der
TH Aschaffenburg
in Aschaffenburg.



Luca Spielmann, M. Eng.
ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter im Labor für
Simulation, Steuerung
und Regelung der
TH Aschaffenburg
in Aschaffenburg.



**Prof. Dr.-Ing. Klaus
Zindler**
ist Vizepräsident für
Forschung und Leiter des
Labors für Simulation,
Steuerung und Regelung
der TH Aschaffenburg
in Aschaffenburg.

Automatische Spurführung von Flurförderzeugen mittels KI

Im Verbundprojekt KAnIS forscht die TH Aschaffenburg mit Linde Material Handling an neuen KI-basierten Algorithmen zur querdynamischen Fahrzeugführung von Flurförderzeugen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines universell einsetzbaren Regelungskonzepts, das verschiedene Arten von Flurförderzeugen automatisch führt, im Betrieb auftretenden Fahrzeugparameterschwankungen gezielt Rechnung trägt und darüber hinaus auch den jeweiligen Fitnesszustand der Fahrzeuge berücksichtigt.



© Linde Material Handling, Aschaffenburg

1	MOTIVATION
2	MODELLBASIERTER REGULUNGSENTWURF NICHT ZIELFÜHREND
3	EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH AUTONOME FLURFÖRDERZEUGE
4	PRINZIP DER SPURFÜHRUNG
5	ZUSAMMENFASSUNG

1 MOTIVATION

Die Automatisierung von Intralogistikprozessen ist eine Grundvoraussetzung, um die Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen in einem globalen Markt zu sichern. Der Fokus liegt auf der Steigerung der Effizienz des innerbetrieblichen Materialflusses durch eine autonome und intelligent vernetzte Logistikflotte, wofür zunächst einige Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Eine zentrale Rolle nimmt diesbezüglich die automatische Spurführung von Flurförderzeugen ein. Eine typische, innerbetriebliche Logistikflotte besteht aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Flurförderzeugen. So setzt sich auch das Produktportfolio von Linde Material Handling aus unterschiedlichen Arten von Flurförderzeugen zusammen. Hierzu gehören beispielsweise Gegengewichtstapler, Schubmaststapler und Schmalgangstapler in verschiedenen Varianten. Durch die ausgeprägte Heterogenität der Logistikflotten liegt der Fokus auf der automatischen Spurführung der einzelnen, teils sehr unterschiedlichen Flottenmitglieder.

2 MODELLBASIERTER REGULUNGSENTWURF NICHT ZIELFÜHREND

Diverse Beiträge auf verschiedenen internationalen Konferenzen verdeutlichen, wie intensiv an der automatischen Spurführung von Flurförderzeugen geforscht wird (zum Beispiel [1–4]). Häufig werden klassische Regelungskonzepte vorgestellt, die es dem Fahrzeug ermöglichen, einer definierten Sollbahn hochgenau zu folgen. Der Regelungsentwurf erfolgt hierbei fast ausschließlich modellbasiert. Dafür ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Regelstrecke notwendig. Bei der Automatisierung einer heterogenen Logistikflotte erweist sich dieser Ansatz als sehr zeitintensiv. So müssen sowohl die Modellentwicklung als auch der Regelungsentwurf für jedes Flottenmitglied separat durchgeführt werden, da das dynamische Verhalten der jeweiligen Flurförderzeuge durch die variantenspezifischen Fahrzeugparameter stark variiert. Hinzu kommt das Ladegut, das Flurförderzeuge im Betrieb transportieren. Durch die Aufnahme einer Last ändert sich das Gesamtgewicht des Flurförderzeugs, das zu einer Verlagerung des Schwerpunkts und somit zu einem veränderten fahrdynamischen Verhalten führt. Andere Fahrzeugparameter, wie zum Beispiel der Reifendurchmesser, hängen vom jeweiligen Fitnesszustand der einzelnen Flottenmitglieder ab und ändern sich verschleißbedingt mit zunehmender Lebensdauer.

Eine Recherche hinsichtlich geeigneter Fahrzeugführungssysteme im Kontext einer heterogenen Logistikflotte verdeutlicht, dass klassische Regelungsverfahren für das beschriebene Anwendungsszenario Nachteile mit sich bringen. Beispielsweise ermöglichen klassische, robuste Regelungskonzepte zwar eine stabile Fahrzeugführung für eine Vielzahl unterschiedlicher Flurförderzeugvarianten, erfüllen aber aufgrund der prinzipbedingten konservativen Auslegung des Reglers nicht mehr die Anforderungen hinsichtlich der Regelgüte. Oft ist eine hochgenaue Führung der Flurförderzeuge, bezogen auf Position und Orientierung, wie bei der Lastaufnahme, zwingend erforderlich.

3 EFFIZIENZSTEIGERUNG DURCH AUTONOME FLURFÖRDERZEUGE

Im Projekt KAnIS erforscht die TH Aschaffenburg gemeinsam mit Linde Material Handling die Steigerung der Effizienz des innerbetrieblichen Materialflusses durch den Einsatz einer automatisierten und intelligent vernetzten Logistikflotte. Durch den Austausch von Lokalisierungs- und Perzeptionsdaten der einzelnen Flottenmitglieder sowie einer kooperativen Auftrags- und Energieplanung soll die Effizienz der Logistikprozesse maximiert werden. Eine automatische Spurführung der einzelnen Flurförderzeuge stellt die Grundvoraussetzung dar. Um der beschriebenen Problemstellung gerecht zu werden, dient die Entwicklung eines universell einsetzbaren Regelungskonzepts zur querdynamischen Fahrzeugführung aller Flurförderzeuge einer heterogenen Logistikflotte als zentrales Teilarbeitspaket des Forschungsprojekts.

Die stetige Weiterentwicklung der KI-Methoden führt zu neuen Möglichkeiten, die auch zur automatischen Spurführung genutzt werden können. Die Verfahren des Reinforcement Learning (RL) imitieren den menschlichen Lernvorgang. Hierbei wird zur Lösung einer definierten Aufgabe, wie der querdynamischen Fahrzeugführung, kontinuierlich Erfahrung durch die Interaktion mit der Umgebung aufgebaut [5]. Durch die kontinuierliche Anpassung der Regelstrategie eignet sich diese Methode ideal für das beschriebene Anwendungsgebiet der Spurführung einer heterogenen Logistikflotte. Es ist sowohl eine Adaption hinsichtlich verschiedener Fahrzeugvarianten als auch variierender Parameter während des Betriebs möglich. Verschleißbedingte Veränderungen des dynamischen Fahrzeugverhaltens werden ebenfalls berücksichtigt. Mit diesem Ansatz werden sowohl die Anforderungen hinsichtlich der Robustheit als auch der Regelgüte erfüllt.

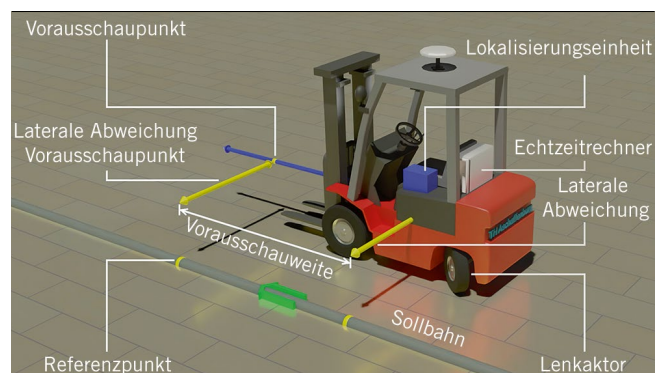


BILD 1 Prinzip der Spurführung eines Flurförderzeugs (© TH Aschaffenburg)

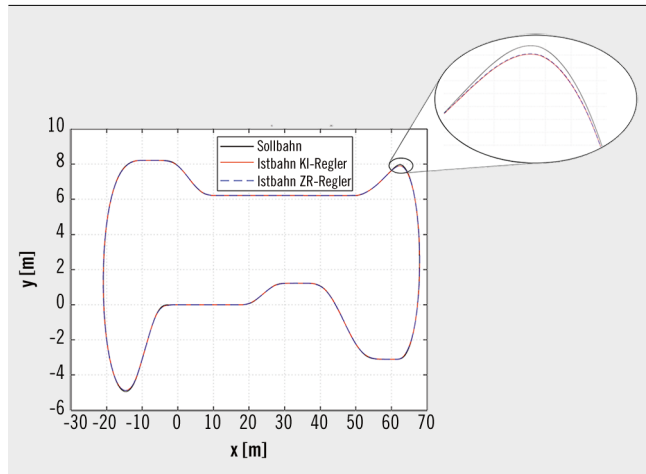


BILD 2 Rundkurs mit automatischer Spurführung eines Linde E30 mit unterschiedlichen Regelungskonzepten (© TH Aschaffenburg)

Damit der Erfahrungsaufbau zur querdynamischen Fahrzeugführung für jede Flurförderzeugvariante nicht ständig von Grund auf durchgeführt werden muss, wird das Anpassen der Regelstrategie in zwei Phasen unterteilt (sogenanntes Training). In der ersten Phase wird der KI-Regler in der Simulation anhand eines Modells unter Verwendung der Fahrzeugparameter einer nominellen Variante einmalig vortrainiert. Da sich die verschiedenen Flurförderzeuge im fahrdynamischen Grundverhalten ähneln, kann darauf aufbauend in einer zweiten Phase die Feinanpassung an das tatsächlich geführte Fahrzeug und die gegebenen Rahmenbedingungen (Parameterschwankungen durch Zuladung oder Verschleiß) erfolgen.

4 PRINZIP DER SPURFÜHRUNG

BILD 1 zeigt einen Gabelstapler neben der Sollbahn. Die vorab geplante Trajektorie wird auf einem Echtzeitrechner als Datensatz hinterlegt. Dieser enthält alle Informationen, die zur automatischen Fahrzeugführung benötigt werden, wie die kartesischen Koordinaten einzelner Stützpunkte und deren Krümmung. Das Hauptziel besteht darin, das Flurförderzeug so genau wie möglich entlang der Bahn zu führen, sodass lediglich eine sehr geringe laterale Abweichung zwischen der Sollbahn und dem Fahrzeug resultiert. Die Abweichung kann unter Verwendung geeigneter Algorithmen auf Basis der Eigenposition des Flurförderzeugs und der auf dem Echtzeitrechner vorliegenden Sollbahn ermittelt werden [6]. Abhängig davon berechnet der Regler einen geeigneten Soll-Lenkwinkel, der vom lagegeregelten Lenkaktor als tatsächlicher Lenkwinkel an der Hinterachse des Flurförderzeugs eingestellt wird. Unter regelungstechnischen Aspekten ist es vorteilhaft, anstelle des Fahrzeugschwerpunkts einen Vorausschaupunkt vor dem Flurförderzeug zu haben. Grund hierfür ist das nichtminimalphasige Systemverhalten, das sich im Fall der Führung des Schwerpunkts aufgrund der Hinterachslenkung und des ausschlagenden Fahrzeughecks ergibt [7].

4.1 SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Eignung des KI-basierten Regelungskonzepts zur querdynamischen Fahrzeugführung wird durch Simulationsuntersuchungen geprüft. Zum Einsatz kommt ein Simulationsmodell, das die Dyna-

mik des lagegeregelten Lenkaktors, das fahrdynamische Verhalten des Flurförderzeugs und die Relativbewegung des Fahrzeugs zur Bahn beschreibt. Die exakte Herleitung, Analyse und Validierung des Modells wird in [7] beschrieben. Als betrachtetes Fahrmanöver wird vorab ein Rundkurs geplant, auf dem das Flurförderzeug möglichst exakt geführt werden soll. Zunächst wird die automatische Spurführung einer nominellen Flurförderzeugvariante erprobt, wie sie der Gabelstapler Linde E30 [8] darstellt. Dieser wurde auch zum vorab durchgeführten Training des KI-Reglers genutzt (erste Trainingsphase). Um die Regelgüte des KI-basierten Ansatzes einzuordnen, wird zusätzlich ein klassischer, modellbasierter Regler eingesetzt, der ebenfalls für diese Flurförderzeugvariante ausgelegt wurde. Die eingesetzte Zustandsregelung (ZR) ist ein weit verbreitetes Konzept, das unter Berücksichtigung der Grenzen des Stellglieds durch die Rückführung aller Zustandsgrößen der Regelstrecke eine beliebige Lage der Pole und somit eine beliebige Dynamik des geschlossenen Regelkreises ermöglicht.

BILD 2 zeigt die Sollbahn und die beiden tatsächlich gefahrenen Bahnen unter Verwendung der vorgestellten Regler (ZR- und KI-Regler) mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s. In beiden Fällen kann das Flurförderzeug entlang der vorgegebenen Sollbahn geführt werden. Der Verlauf der Querabweichung verdeutlicht, **BILD 3**, dass die maximale Abweichung im gesamten Rundkurs circa 7 cm beträgt (siehe Ausschnitt in **BILD 2**). In dieser Vergrößerung ist außerdem erkennbar, wie ähnlich die resultierende laterale Abweichung beider Regelungskonzepte zur Sollbahn ist.

Die Eignung eines KI-basierten Regelungskonzepts zur Spurführung einer einzelnen Fahrzeugvariante (Linde E30) wurde bereits gezeigt. **BILD 2** und **BILD 3** bestätigen, dass die resultierende Dynamik des geschlossenen Regelkreises unter Verwendung beider Regler vergleichbar ist. Daher wird untersucht, inwieweit sich das KI-basierte Regelungskonzept einem anderen Flottenmitglied anpassen kann. Diesbezüglich wird der an der nominellen Fahrzeugvariante bereits vortrainierte KI-Regler an einem deutlich größeren Flurförderzeug (Linde E80 [8]) nachtrainiert. Um den Vorteil der Anpassung der Regelstrategie zu verdeutlichen, werden in **BILD 4** die Verläufe der Querabweichung unter Verwendung

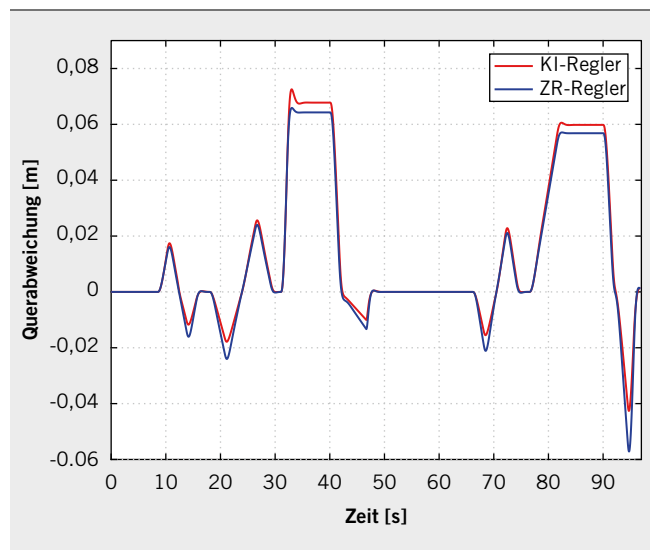


BILD 3 Resultierender Verlauf der Querabweichung eines Linde E30 (© TH Aschaffenburg)

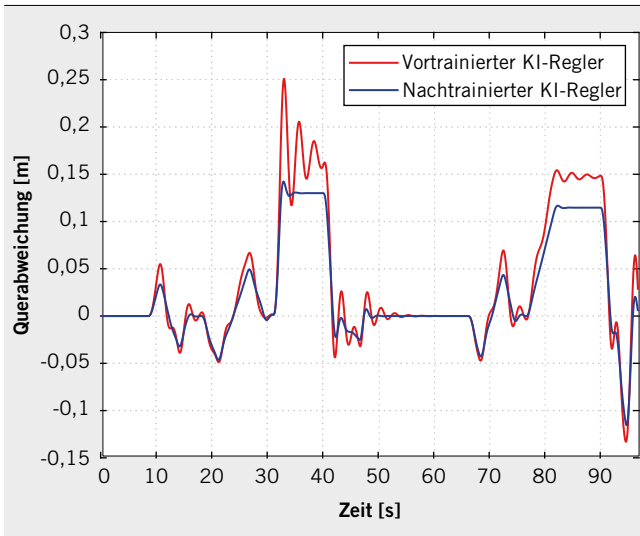


BILD 4 Resultierender Verlauf der Querabweichung eines Linde E80
(© TH Aschaffenburg)

jeweils des vor- und nachtrainierten KI-Reglers zur Spurführung des Linde E80 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass sich die Adaption an das zu führende Flottenmitglied sowohl positiv auf die maximale Querabweichung als auch auf die Dämpfung des geschlossenen Regelkreises auswirkt.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das beschriebene KI-basierte Regelungskonzept ermöglicht die querdynamische Fahrzeugführung einzelner Flurförderzeuge einer heterogenen Logistikflotte. Durch die kontinuierliche Anpassung an verschiedene Flurförderzeugvarianten kann eine sichere und hochgenaue Fahrzeugführung ermöglicht werden. Der Ansatz ist außerdem dazu in der Lage, im Betrieb auftretende Parameterschwankungen und den jeweiligen Fitnesszustand verschiedener

Flurförderzeuge zu berücksichtigen. Durch die Aufteilung des Trainingsprozesses in zwei Phasen kann darüber hinaus eine sichere und robuste Fahrzeugführung garantiert werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Li, L.; et al.: Path-Following Control for Self-driving Forklifts based on Cascade Disturbance Rejection with Coordinates Reconstruction. 39th Chinese Control Conference, Shenyang, 2020
- [2] Tamba, T. A.; et al.: Trajectory Generation of an Unmanned Forklift for Autonomous Operation in Material Handling System. SICE Annual Conference, Chofu, 2008
- [3] Bhutta, R.; et al.: Collision-Free Navigation of Forklifts by Points-of-Interest Switching. International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Daejeon, 2012
- [4] Mohammadi, A.; et al.: Model Predictive Motion Control of Autonomous Forklift Vehicles with Dynamics Balance Constraint. 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Phuket, 2016
- [5] Sutton, R.; et al.: Reinforcement Learning: an introduction. Cambridge, Massachusetts/London: The MIT Press, 2018
- [6] Zindler, K., et al.: Querdynamische Fahrzeugführung zur reproduzierbaren Erprobung von Sicherheitssystemen. In: at-Automatisierungstechnik 60 (2012), Nr. 2, S. 61–73
- [7] Sauer, T.; et al.: Automatic track guidance of industrial trucks using self-learning controllers considering a priori plant knowledge. International Conference on Control, Automation and Diagnosis, Grenoble, 2021
- [8] Linde Material Handling: Produktfinder. Online: [https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting\[field\]=productType&sorting\[direction\]=ASC&productTypes\[\]=2377](https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting[field]=productType&sorting[direction]=ASC&productTypes[]=2377), aufgerufen: 26. Juli 2022

DANKE

Das Projekt Kooperative Autonome Intralogistik Systeme (KANIS) wird vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie von 2020 bis 2023 gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:

www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide