



Potenzialstudie

Fernsteuerung von Transport- und Umschlaggeräten in Hafenterminals

Impressum

Fernsteuerung von Transport- und Umschlaggeräten in Hafenterminals

Potenzialstudie

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carlos Jahn

Leiter Fraunhofer CML

Autoren:

M. Sc. Sina Willrodt

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Holger Schulz, M. Systems Eng.

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Projektzentrum „Verkehr, Mobilität und Umwelt“

M. Sc. Jan Christian Wieck

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Dipl.-Wi.-Ing. Johann Bergmann

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

M. Sc. Dirk Mönicke

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML
Blohmstrasse 32
21079 Hamburg
pr@cml.fraunhofer.de
www.cml.fraunhofer.de

Titelbild: © Fraunhofer CML

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISBN (Printausgabe): 978-3-8396-2016-8

ISBN (e-Book): 978-3-8396-2017-5

Druck und Weiterverarbeitung: Fraunhofer-Druckerei, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2024

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Executive Summary	15
2 Einleitung und Zielsetzung	17
3 Fernsteuerung	19
3.1 Fernsteuerung	19
3.2 Automatisierung vs. Fernsteuerung	19
3.3 Begriffsbezeichnungen	19
4 Hafenterminals	21
4.1 Terminaltypen	21
4.2 Terminalprozesse	21
4.3 Transport- und Umschlaggeräte je Terminaltyp	22
5 Potenzialanalyse und -bewertung	23
5.1 Analyse- und Bewertungsmethodik	23
5.2 Anforderungs- und Bewertungskriterien	23
5.2.1 Wirtschaftliche Potenziale	24
5.2.2 Organisatorische Potenziale	24
5.2.3 Technische Potenziale	24
5.3 Validierung und Verifikation mit der Industrie	24
5.4 Potenzielle Anwendungsbereiche für die Fernsteuerung von Fahrzeugen	24
5.4.1 Zugmaschine im RoRo-Terminal	24
5.4.2 Reach Stacker im Containerterminal	26
5.4.3 Radlader im Massengutterminal	27
6 Technische Anforderungen an eine Fernsteuerung im Terminal	29
6.1 Infrastruktur	29
6.2 Fernsteuerungs-Arbeitsplatz	29
6.3 Fahrzeuge	30
6.4 Allgemeine Aufwände	32
6.5 Zeithorizonte	32

7 Rechtliche Rahmenbedingungen	35
7.1 Grundlagen des teleoperierten, automatisierten und autonomen Fahrens	35
7.2 Aktuelle Gesetzeslage	37
7.3 Teleoperiertes Fahren auf Betriebsgeländen	37
7.3.1 Technische Aufsicht	38
7.3.2 Halter	39
7.3.3 Hersteller	39
7.4 Zusammenfassung rechtlicher Rahmenbedingungen	40
8 Geeignete Geschäftsmodelle	41
8.1 Geschäftsmodell Teleoperation-as-a-Service	42
8.2 Geschäftsmodell Fernsteuerungszentrum	43
8.3 Geschäftsmodell Hybridmodell	44
8.4 Geschäftsmodell Stevedoring-Modell	44
9 Ökonomische Potenziale	45
9.1 Identifikations- und Bewertungsmethodik	45
9.2 Bewertungskategorien	45
9.2.1 Prozess	46
9.2.2 Personal	46
9.2.4 Kosten	46
9.3 Ökonomische Potenzialbewertung	46
9.3.1 Zugmaschine im RoRo-Terminal	46
9.3.2 Reach Stacker im Containerterminal	48
9.3.3 Radlader im Massengutterminal	49
9.4 Zusammenfassung ökonomische Potenziale und Fazit	51
10 Steckbriefe	53
Ferngesteuerte Zugmaschine im RoRo-Terminal	54
Ferngesteuerter Reach Stacker im Containerterminal	55
Ferngesteuerter Radlader im Massengutterminal	56
11 Literaturverzeichnis	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendungsbereiche Zugmaschine	25
Abbildung 2: Anwendungsbereiche Reach Stacker	26
Abbildung 3: Anwendungsbereiche Radlader	27
Abbildung 4: Ferngesteuertes/ Automatisiertes Fahrzeug auf einem Terminal)	35
Abbildung 5: Ferngesteuertes Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr	35
Abbildung 6: Entwicklungsstufen des automatisierten Fahrens	36
Abbildung 7: Morphologischer Kasten zur Erstellung der Geschäftsmodelle	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Transport- und Umschlagsgeräte je Terminaltyp	22
Tabelle 2: Anforderungskriterien.	23
Tabelle 3: Herausforderungen und Chancen für ferngesteuerte Zugmaschinen im RoRo-Terminal	25
Tabelle 4: Herausforderungen und Chancen für ferngesteuerte Reach Stacker im Containerterminal.	26
Tabelle 5: Herausforderungen und Chancen für ferngesteuerte Radlader im Massengutterminal	27
Tabelle 6: Technische Anforderungen an Zugmaschinen auf RoRo-Terminals	30
Tabelle 7: Technische Anforderungen an Reach Stacker auf Containerterminals	31
Tabelle 8: Technische Anforderungen an Radlader auf Massengutterminals	32
Tabelle 9: Entwicklung nach Zeithorizonten für Zugmaschinen auf RoRo-Terminals	33
Tabelle 10: Entwicklung nach Zeithorizonten für Reach Stacker auf Containerterminals	33
Tabelle 11: Entwicklung nach Zeithorizonten für Radlader auf Massengutterminal	33
Tabelle 12: Geschäftsmodell: Teleoperation-as-a-Service	42
Tabelle 13: Geschäftsmodell: Fernsteuerungszentrum	43
Tabelle 14: Geschäftsmodell: Hybridmodell	44
Tabelle 15: Identifizierte Potenzialbewertungskategorien	45
Tabelle 16: Potenzialbewertung des Anwendungsbereichs Zugmaschine im RoRo-Terminal	47
Tabelle 17: Ökonomische Potenziale des Anwendungsbereichs Zugmaschine im RoRo-Terminal.	48
Tabelle 18: Potenzialbewertung des Anwendungsbereichs Reach Stacker im Containerterminal	48
Tabelle 19: Ökonomische Potenziale des Anwendungsbereichs Reach Stacker im Containerterminal.	49
Tabelle 20: Potenzialbewertung des Anwendungsbereichs Radlader im Massengutterminal.	50
Tabelle 21: Ökonomische Potenziale des Anwendungsbereichs Radlader im Massengutterminal	50

Abkürzungsverzeichnis

AGV	Automated Guided Vehicle
Fraunhofer CML	Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen
Fraunhofer IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light Detecting and Ranging
MPT	Multi Purpose Terminal
OCR	Optical Character Recognition
RoRo	Roll on – roll off
RTK	Real-Time Kinematic
SAE	Society of Automotive Engineers
SPMT	Self-Propelled Modular Transporter
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVO	Straßenverkehrsordnung
SVG	Schweizer Straßenverkehrsgesetz
TOS	Terminal Operating System
TRL	Technology Readiness Level
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2X	Vehicle-to-Everything
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
WÜ	Wiener Übereinkommen
XaaS	Everything-as-a-Service



1 Executive Summary

Die Entwicklung des automatisierten Fahrens schreitet stetig voran. Die Zuverlässigkeit von automatisierten Fahrzeugen bei allen Umgebungs- und Witterungsbedingungen stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Die Fernsteuerung von Fahrzeugen bietet sich als Brückentechnologie an, weil das Fahrzeug durch eine Technische Aufsicht überwacht und gesteuert wird. In kritischen Situationen kann direkt eingegriffen werden. Für Hafenterminalbetreiber ist relevant, inwiefern sich durch die Fernsteuerung von Fahrzeugen Effizienzpotenziale ergeben können.

Um diese Fragestellungen näher zu untersuchen, hat das Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen (CML) zusammen mit dem Projektzentrum Verkehr, Mobilität und Umwelt des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) eine Potenzialstudie hinsichtlich der Fernsteuerung von Fahrzeugen in Terminals durchgeführt.

Methodisch wurden potenziell geeignete Anwendungsbereiche in Hafenterminals identifiziert sowie eine technische Anforderungsanalyse, eine Betrachtung rechtlicher Rahmenbedingungen und ökonomischer Potenziale und eine Analyse geeigneter Geschäftsmodelle durchgeführt. Zur Validierung und Verifizierung wurden Experteninterviews mit potenziellen Stakeholdern (z.B. Hafen- und Terminalbetreiber) geführt.

In der Potenzialanalyse und -Bewertung wurden die nachfolgenden drei Anwendungsbereiche als besonders relevant identifiziert:

- Ferngesteuerte Zugmaschine im RoRo-Terminal,
- Ferngesteuerter Reach Stacker im Containerterminal,
- Ferngesteuerter Radlader im Massengutterterminal.

Im Rahmen einer ersten technischen Anforderungsanalyse wurden die notwendige Ausstattung der Fahrzeuge, die erforderliche technische Infrastruktur sowie die Anforderungen an den Fernsteuerungsarbeitsplatz für alle identifizierten Anwendungsbereiche untersucht und mit den sich ergebenden Herausforderungen vorgestellt.

Im Rahmen der Potenzialstudie wurden die Grundlagen hinsichtlich der rechtlichen Rahmenbedingungen des teleoperierten Fahrens auf Betriebsgeländen dargestellt. Hierzu zählt bspw. die aktuelle Gesetzeslage, eine Definition der im rechtlichen Kontext verwendeten Begriffe teleoperiertes, automatisiertes und autonomes Fahren sowie die Beschreibung der verschiedenen Entwicklungsstufen des automatisierten Fahrens.

Zur Aufstellung geeigneter Geschäftsmodelle ist zu definieren, wer die Rollen des Herstellers, der Technischen Aufsicht und des Halters einnimmt. Es wurden die nachfolgenden Geschäftsmodelle identifiziert: Teleoperation-as-a-Service, Fernsteuerungszentrum, das Hybridmodell sowie das Stevedoring-Modell.

Im Rahmen der ökonomischen Potenzialbewertung erfolgte die Bewertung anhand von 13 individuellen Potenzialkategorien unter Berücksichtigung eines kurz- und mittelfristigen Bewertungshorizonts. Es wurden ökonomische Potenziale bei dem Einsatz von ferngesteuerten Fahrzeugen identifiziert. Die größten Potenziale werden innerhalb der Hauptkategorien Technologie und Personal, gefolgt von Prozessen, erwartet.

Alle Studienergebnisse wurden in drei Steckbriefen zusammengefasst. Künftig könnte in einem angestrebten Folgeprojekt ein ferngesteuertes Fahrzeug sowie der dazugehörige Fernsteuerungs-Arbeitsplatz prototypisch umgesetzt werden.

2 Einleitung und Zielsetzung

Die Entwicklung des automatisierten Fahrens schreitet sowohl im öffentlichen Verkehr als auch in geschlossenen Betriebsbereichen voran und wird zunehmend in der Güterlogistik eingesetzt. Aspekte wie Fahrermangel, hohe Sicherheitsbedarfe und -anforderungen auf der Straße sowie angestrebte Verkehrsflussoptimierungen fördern die Einführung des automatisierten Fahrens.

In der Realität stellt vor allem die Zuverlässigkeit von automatisierten Fahrzeugen unter allen Wetter- und Umweltbedingungen eine große Herausforderung dar. So kommt es im Realbetrieb immer wieder zu Situationen, in denen das Eingreifen eines menschlichen Fahrers notwendig wird. Insbesondere für kritische Infrastrukturen, wie beispielsweise Hafenterminals, hindert die bis dato noch nicht lückenlos gegebene Zuverlässigkeit die flächendeckende Verbreitung des automatisierten Fahrens.

Um von den Vorteilen des automatisierten Fahrens zu profitieren, gleichzeitig jedoch einen reibungslosen Betrieb sowie die Sicherheit zu gewährleisten, bietet sich die Fernsteuerung von Fahrzeugen als Brückentechnologie an. Bei dieser wird das Fahrzeug durch einen externen Fahrer gesteuert und überwacht. Für die Terminalbetreiber stellt sich die Frage, inwiefern der Einsatz solcher Fahrzeuge möglich und sinnvoll sein könnte.

Ziel der Studie ist die Ermittlung potenziell geeigneter Anwendungsbereiche und Fahrzeugkategorien sowie der technischen Anforderungen für den Einsatz ferngesteuerter Fahrzeuge in Hafenterminals.

Mit der Expertise in Hafen- und Terminalprozessen, Hafentechnologien und im Bereich des (hoch-)automatisierten Fahrens untersuchten das Fraunhofer CML und das Fraunhofer IML diese Fragestellungen anhand einer Potenzialstudie.

3 Fernsteuerung

Der Begriff „Fernsteuerung“ oder „Teleoperation“ ist im Zusammenhang mit Robotern und der Automatisierung von Maschinen seit Langem gebräuchlich und etabliert. Nachfolgend werden einige im Zusammenhang mit dem Thema Fernsteuerung stehende Begriffe definiert.

3.1 Fernsteuerung

Dem Wort „Fernsteuerung“ nach handelt es sich um die Steuerung einer Maschine aus der Ferne, d.h. ohne direkte Interaktion des Bedieners mit der Maschine. Dies entspricht dem einhelligen wissenschaftlichen Verständnis des Begriffs¹.

Erste Ansätze zur Fernsteuerung von Maschinen gab es bereits in den 1940er Jahren, hier erfolgte die Steuerung noch rein mechanisch². Mitte der 1950er Jahre erfolgte die erste elektrische Fernsteuerung einer Maschine. Anfang der 70er Jahre wurden ferngesteuerte Bodenfahrzeuge im Rahmen der Mondmissionen der USA und der Sowjetunion eingesetzt³. In den letzten Jahren hat das wissenschaftliche und industrielle Interesse an der Fernsteuerung von Fahrzeugen zugenommen, insbesondere als Brückentechnologie zum vollständig automatisierten Betrieb⁴.

3.2 Automatisierung vs. Fernsteuerung

Der Übergang zwischen Teleoperation und (teil-)automatisiertem Fahren ist in der Praxis oft fließend. So werden Fernsteuerer bei ihren Aufgaben häufig durch umfangreiche Assistenzsysteme unterstützt, überwachen einen autonomen Betrieb oder greifen in diesen ein, wenn er an seine Grenzen gerät. Für die weitere Betrachtung im Rahmen dieser Studie ist jedoch eine Abgrenzung und Unterscheidung der Begriffe notwendig. So sieht und bewertet bei der Fernsteuerung ein menschlicher Operator die aktuelle Situation rund um das Fahrzeug und trifft auf Basis ihm vorliegender Daten Entscheidungen, wie z.B. Fahrbefehle, die an das Fahrzeug übermittelt und von diesem ausgeführt werden. Im automatisierten Betrieb werden diese Schritte von einer Recheneinheit mit Hilfe von Algorithmen und Künstlicher Intelligenz (KI) übernommen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Betriebsarten besteht darin, wer die Entscheidungen trifft - der Mensch oder der Computer.

Die Kombination von Fernsteuerung und automatisiertem Verhalten zeigt insbesondere in komplexen Umgebungen einer kritischen Infrastruktur, wie zum Beispiel Hafenterminals, ein interessantes und vielversprechendes Potenzial. Aufgrund sich dynamisch verändernder Umgebungen, sowie möglicherweise auftretenden Störungen, ist das Technology Readiness Level (TRL) für einen voll automatisierten Betrieb häufig noch nicht hoch genug, um einen hinreichend zuverlässigen und reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Hier kann die Fernsteuerung eine Brücke zwischen dem manuellen und dem zukünftig automatisierten Betrieb schlagen.

3.3 Begriffsbezeichnungen

Technische Aufsicht

Die Technische Aufsicht ist eine natürliche Person, die das Fahrzeug während des Betriebs deaktivieren, Fahrmanöver durchführen und freigeben kann (Kapitel 7)⁵.

Halter

Der Halter eines Fahrzeugs muss gewährleisten, dass die Reparatur- und Wartungsinformationen, welche vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden, regelmäßig überprüft werden und täglich vor Betriebsbeginn eine erweiterte Abfahrkontrolle durchgeführt wird (Kapitel 7)⁶. Auf Umschlagterminals ist der Halter der terminalintern genutzten Transport- und Umschlaggeräte meistens der (Terminal-) Betreiber, engl. Operator.

Hersteller

Der Hersteller eines Fahrzeugs muss über den gesamten Entwicklungs- und Betriebszeitraum gegenüber dem Kraftfahrt-Bundesamt und der zuständigen Behörde nachweisen, dass die elektronische und elektrische Architektur vor Angriffen gesichert ist. Zudem muss eine Risikobeurteilung vorgenommen und dem Kraftfahrt-Bundesamt nachgewiesen werden. Ebenfalls muss der Hersteller eine sichere Funkverbindung gewährleisten, eine Systembeschreibung vornehmen und ein Betriebshandbuch erstellen. Zusätzlich müssen Schulungen für die am Betrieb beteiligten Personen angeboten werden (Kapitel 7)⁷.

¹ Quelle: Sheridan 1995; Nof 2009

² Quelle: Hokayem und Spong 2006

³ Quelle: Fong und Thorpe 2001

⁴ Quelle: Linne und Andersson 2021; Majstorovic et al. 2022

⁵ Quelle: David Bickenbach 2022

⁶ Quelle: Bundesgesetzblatt Online 2022 §13 Abs. 1

⁷ Quelle: Bundesministerium der Justiz 2023 §1f Abs. 3

3 Fernsteuerung

Teleoperator

Bei einem Teleoperator handelt es sich um ein System, welches ermöglicht, ferngesteuert Operationen oder Aktionen auszuführen. Ein solcher wird oft in der Robotik zur Steuerung von Maschinen oder Fernsteuerung von Fahrzeugen eingesetzt. Der Teleoperator ermöglicht der Technischen Aufsicht, eine Aufgabe wie bspw. das Steuern eines Fahrzeuges aus der Ferne durchzuführen, ohne dass diese physisch vor Ort sein muss.

Entwicklungsstufen des automatisierten Fahrens

Beim automatisierten und autonomen Fahren wird beispielsweise vom Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) zwischen fünf Entwicklungsstufen unterschieden. Darüber hinaus existiert seitens der SAE International eine weitere Definition anhand der Norm J3016, hierbei wird die Automatisierung von Fahrzeugen und deren Fahrfunktionen anhand von sechs SAE-Leveln beschrieben. Innerhalb der vorliegenden Potenzialstudie wird weitestgehend die Definition des VDA angewendet (Kapitel 7).

Die Entwicklung des automatisierten Fahrens schreitet stetig voran. Die Zuverlässigkeit von automatisierten Fahrzeugen bei allen Umgebungs- und Witterungsbedingungen stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Die Fernsteuerung von Fahrzeugen bietet sich als Brückentechnologie an, weil das Fahrzeug durch eine Technische Aufsicht überwacht und gesteuert wird. Für Hafenterminalbetreiber ist relevant, inwiefern sich durch die Fernsteuerung von Transport- und Umschlaggeräten Effizienzpotenziale ergeben können.

Um diese Fragestellungen näher zu untersuchen, hat das Fraunhofer CML zusammen mit dem Projektzentrum Verkehr, Mobilität und Umwelt des Fraunhofer IML eine Potenzialstudie hinsichtlich der Fernsteuerung von Fahrzeugen in Terminals durchgeführt. In der Studie wurden potenziell geeignete Anwendungsbereiche in Hafenterminals identifiziert sowie eine technische Anforderungsanalyse, eine Betrachtung rechtlicher Rahmenbedingungen und ökonomischer Potenziale und eine Analyse geeigneter Geschäftsmodelle durchgeführt. Zur Validierung und Verifizierung wurden Experteninterviews mit potenziellen Stakeholdern geführt. Alle Studienergebnisse wurden in drei Steckbriefen zusammengefasst.