



Patrick Driesch (oben), Arnim Spengler (unten). Fotos: Daniel Schumann

Die angestrebte Reduktion von Treibhausgasen und Luftschadstoffen im Sektor Verkehr und Transport erfordert die Abkehr von bestehenden konventionellen Antriebsformen hinzu alternativen Kraftstoffen und (teil-)elektrifizierten Antrieben. Dies betrifft auch die mobilen Maschinen. In diesem Beitrag wird die Erprobung zweier Typen von Hafenumschlaggeräten mit dem alternativen Kraftstoff Erdgas beschrieben.

Alternative Kraftstoffe für mobile Maschinen

Eine Untersuchung des Einsatzes von Erdgas
bei Hafenumschlaggeräten

Von Patrick Driesch, Arnim Spengler,
Alexander Malkwitz & Dieter Schramm

Das Verkehrsaufkommen in der Europäischen Union ist hoch und wird auch zukünftig weiter ansteigen. Dies wird einerseits durch den Wunsch der Menschen nach individueller Mobilität in unterschiedlichen Formen zu jeder Tageszeit und bei kurzen Wartezeiten getrieben. Andererseits nimmt der Bedarf an internationalen Gütern zu, so dass die Anzahl an Gütertransporten auf der Straße oder auf multimodalen Wegen wie zum Beispiel durch den aufeinanderfolgenden Transport der Güter auf dem Straßen-, See- und Schienenweg ansteigt. Dies hat zur Folge, dass der Transportsektor ein wesentlicher Verursacher von Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union ist.

Die gegenwärtigen Bestrebungen der Europäischen Union im Rahmen des europäischen Grünen Deals zielen darauf ab, die bestehenden Strukturen der Mobilität zunehmend effizienter und ökologischer zu gestalten, so dass eine klimaneutrale Gesellschaft erreicht werden kann [1]. Im Kontext einer nachhaltigen Mobilität soll es so ermöglicht werden, dass der bestehende Wunsch nach Mobilität durch Verkehrsträger bedient wird, die einen geringfügigen oder gar keinen Ausstoß an klimaschädlichen Treibhausgasen und lokalen Luftschadstoffen vor Ort verursachen. Verfolgte Lösungsansätze sind die Elektromobilität, die Hybridisierung der Mobilität oder die Anwendung von auf alternativen Kraftstoffen beruhenden Antrieben. Der Ausstoß an klimaschädlichen Treibhausgasen hängt bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen direkt von der Menge an lokal verbranntem Kraftstoff sowie den Treibhausgasemissionen ab, die bei der Her- und Bereitstellung des Kraftstoffes auftreten. Zusätzlich werden durch den Verbrennungsprozess lokal Schadstoffe in die Luft freigegeben. Elektrifizierte Fahrzeuge weisen zwar lokal keinen Ausstoß an Emissionen auf, jedoch werden bei der Erzeugung und Bereitstellung der elektrischen Ener-

gie ebenfalls energetische Prozesse eingesetzt, die einen CO_2 -Fußabdruck mit sich bringen. Hybride Fahrzeuge können in Abhängigkeit ihres Betriebsmodus sowohl lokale Emissionen als auch mit der Bereitstellung der elektrischen Energie und des Kraftstoffs bedingte Emissionen verursachen. Daraus folgt, dass ein Rückgang der klimaschädlichen Treibhausgasemissionen und lokalen Luftschadstoffe nur durch einen effizienten Betrieb der Fahrzeuge erreicht werden kann. Dazu sind insbesondere die richtigen Antriebsvarianten für die spezifischen Aufgabenstellungen zu bestimmen beziehungsweise die Antriebsvarianten anwendungsspezifisch zu bewerten.

Neben den Verkehrsteilnehmenden wie Pkw oder Lkw, die häufig während des Alltags im direkten Sichtfeld wahrgenommen werden, können zusätzlich auch mobile Maschinen zu dem Sektor Transport und Verkehr gezählt werden. Als mobile Maschinen werden – je nach Definition – unterschiedliche Maschinengattungen in einem Segment zusammengefasst. Nach der Definition der europäischen Verordnung (EU) 2016/1628 kann jede Maschine, die nicht für den Transport von Personen oder Gütern auf der Straße bestimmt ist, als mobile Maschine bezeichnet werden [2]. Somit lassen sich viele vom Aufbau her unterschiedliche Maschinen wie zum Beispiel Bagger oder Hafenumschlaggeräte gesamtheitlich als mobile Maschinen bezeichnen, da diese nicht für den Straßentransport bestimmt sind. Mobile Maschinen werden in erster Linie für die Verrichtung von Arbeit eingesetzt. Dazu besitzen sie im Gegensatz zu Fahrzeugen, die im Straßenverkehr bewegt werden, sowohl einen Fahr- als auch einen Arbeitsantrieb [3]. Obwohl mobile Maschinen in unserem Alltag nicht so präsent sind wie zum Beispiel Pkw oder Lkw, tragen sie dennoch zu einem nicht unerheblichen Anteil zu den verkehrsbedingten Emissionen bei. So betrug der Ausstoß an CO_2 durch

mobile Maschinen in Deutschland im Jahre 2015 etwa neun Prozent des Ausstoßes an CO_2 durch den straßenbedingten Verkehr, und ihr Anteil an den Luftschadstoffen und ausgestoßenen Feinstaubpartikeln überstieg dies sogar [4]. Folglich muss für eine Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen auch ein Rückgang des Emissionsausstoßes von mobilen Maschinen erreicht werden. Gegenwärtig wird der Großteil der mobilen Maschinen mit Dieselmotoren betrieben. Daher umfassen grundsätzliche Lösungsansätze auch im Bereich mobiler Maschinen eine Elektrifizierung, Hybridisierung oder einen Wechsel hin zu auf alternativen Kraftstoffen basierenden Antrieben, die weniger Emissionen verursachen als konventionelle Dieselantriebe. Aufgrund der geforderten Leistungs- und Energiedichten im Alltagsbetrieb der Maschinen sowie alltagstauglichen Reichweiten, kann eine vollständige und vollumfängliche Elektrifizierung beziehungsweise Hybridisierung derzeit noch nicht praktikabel erreicht werden. Vielmehr konzentriert sich die Elektrifizierung auf Einzelsysteme der mobilen Maschine wie zum Beispiel Nebenaggregate [5]. Eine derzeit verfügbare Lösungsalternative besteht in dem Einsatz von Erdgas als Kraftstoffalternative zu konventionellem Diesel. Erdgas kann als alleiniger Kraftstoff in Fremdzündungs- und in einem Kraftstoffmix mit Diesel in Selbstzündungsmotoren eingesetzt werden [6]. Weiterhin kann Erdgas in unterschiedlichen Aggregatzuständen gespeichert werden, was sich positiv auf die volumetrische Energiedichte auswirkt. Ob ein durch Erdgas angetriebener Antriebsstrang einer mobilen Maschine aus ökonomischer und ökologischer Sicht tatsächlich eine praktikable und vorteilhafte Alternative darstellt, muss anwendungsspezifisch während des Betriebsalltags beurteilt werden. Dementsprechend muss eine Erprobung während der vorherrschenden



(1) Dieseltreibender Terminaltraktor (links) und erdgasbetriebener Terminaltraktor (rechts)
Quelle: duisport

Alltagsbedingungen der Maschinen erfolgen. Eine solche Erprobung wurde im durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsprojekt *LeanDeR* an zwei erdgasbetriebenen Hafenumschlaggeräten vorgenommen [7]. Beide Hafenumschlaggeräte wurden während des Alltagsbetriebs am Duisburger Hafen im bestehenden Flottenumfeld eingesetzt und gezielt mit der konventionell dieseltreibenden Variante der Hafenumschlaggeräte verglichen. Zur wissenschaftlichen Begleitung der Erprobung wurde Messtechnik in die erdgasbetriebenen Hafenumschlaggeräte installiert. Weiterhin wurden zusätzlich vergleichbare dieseltreibende Hafenumschlaggeräte als Referenzmaßstab mit Messtechnik ausgerüstet. Die anhand der erhobenen Datenbasis erfolgte Bewertung des alternativen Kraftstoffes Erdgas als Antrieb der betrachteten Hafenumschlaggeräte wird in diesem Beitrag vorgestellt. Nachfolgend wird dazu zunächst konkret der Einsatz von Erdgas als alternativem Kraftstoff diskutiert. Daraufhin werden die betrachteten Hafenumschlaggeräte sowie der durchgeführte Feldversuch näher erläutert. Abschließend werden die

Untersuchungsergebnisse vorgestellt sowie eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

Erdgas als alternativer Kraftstoff

Bei Liquefied Natural Gas (LNG) handelt es sich um stark abgekühltes, aufbereitetes und verflüssigtes Erdgas. Hierbei wird das Erdgas weitgehend von Ethan, Propan, Butan, Stickstoff, Wasser und anderen Komponenten getrennt [8]. Das aufbereitete Erdgas hat einen Methangehalt von bis zu 98 Prozent [9]. Neben LNG, welches stark gekühlt gelagert wird, gibt es die Speicherform als Compressed Natural Gas (CNG), bei dem das Erdgas unter hohem Druck komprimiert und gespeichert wird. Durch den Einsatz von Erdgas kann gegenüber einem Dieseltreibstoff der Ausstoß von CO_2 , NO_x und CO reduziert und eine geringere Entwicklung von Lärmemissionen erreicht werden [10]. Ein Nachteil besteht unter anderem im sogenannten Methanschlupf. Hierunter wird das unbeabsichtigte oder beabsichtigte Entweichen von nicht verbranntem Methan (CH_4) verstanden. Methan ist wesentlich klimaschädlicher als CO_2 und weist ein CO_2 -Äquivalent von etwa 28

Gramm CO_2 pro Gramm Methan auf [11]. Neben den direkten negativen Auswirkungen auf die Umwelt muss zudem die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden. Hierzu zählen die Förderung, Aufbereitung, Pipeline Transport, Verflüssigung, Lagerung und Verteilung und zum Schluss der eigentliche Verbrauch. Dass diese Kette nicht vernachlässigt werden darf, zeigt der Umweltbericht des Projekts *LeanDeR* [11].

Hafenumschlaggeräte

Der Hafenumschlag am Duisburger Hafen ist Teil des multimodalen Verkehrs, in dem Güter anteilig über den See-, Straße- und Schienenweg transportiert werden. Damit die Güter zwischen den einzelnen Bestandteilen des multimodalen Verkehrs ausgetauscht und weitergegeben werden können, ist ein Umschlag der Güter notwendig. So erfolgt auf dem betrachteten Terminal des Duisburger Hafens der Austausch von Gütern zwischen dem Schienen- und Straßenverkehr. Um die umzuschlagenden Güter zwischen den Zügen und den Sattelzugmaschinen auf dem Hafenterminal zu manövrieren, werden sogenannte Hafenumschlaggeräte eingesetzt.



(2) Reachstacker
Quelle: duisport

Dabei werden auf dem betrachteten Hafenterminal die Umschlaggeräte des Typs *Terminaltraktor* (Abb. 1) und *Reachstacker* (Abb. 2) verwendet.

Die Terminaltraktoren werden für den Transport von Sattelaufliegern auf dem Hafengebiet genutzt, wobei sie diese über eine hydraulisch höhenverstellbare Sattelkupplung an deren Königszapfen aufnehmen. Das höhenverstellbare System ermöglicht es dem Fahrer, eine Verbindung mit den Sattelaufliegern herzustellen. Die Maschinen bewegen sich mit einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 30 Kilometer pro Stunde auf dem Terminal, wobei sie dynamisch wechselnde Lasten verfahren. Terminaltraktoren werden teilweise in großen Flotten auf Hafengebieten eingesetzt und sind somit für einen wesentlichen Anteil des Kraftstoffbedarfs und Emissionsausstoßes eines Hafenterminals verantwortlich. Im Forschungsprojekt wurde der Antrieb eines am Markt verfügbaren Terminaltraktors mit einem fremdgezündeten Erdgasmotor erprobt und einer bestehenden konventionell dieselbetriebenen Maschine gegenübergestellt. Dazu wurde die

erdgasbetriebene Maschine über die Projektlaufzeit in die bestehende Flotte auf dem Hafenterminal integriert. Beide Maschinen sind in Abbildung (1) dargestellt und ähneln sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau. Die erdgasbetriebene Maschine weist eine höhere Motorleistung, einen größeren Hubraum und ein höheres Gesamtgewicht auf. Der dieselbetriebene Terminaltraktor wird durch einen Motor nach Emissionsklasse EU STAGE IV angetrieben und besitzt sowohl einen Diesel-Oxidations-Catalysator (DOC) als auch einen Selective Catalyst Reduction (SCR)-Katalysator zur Minderung der Emissionen von Luftschadstoffen. Die erdgasbetriebene Maschine verwendet als Antrieb einen Erdgasmotor nach Emissionsklasse EEV und nutzt für die Abgasnachbehandlung einen Drei-Wege-Katalysator. In beiden Motoren findet eine Abgasrückführung in den Brennraum zur Reduktion von Luftschadstoffen statt. Die Speicherung des Erdgases erfolgt aufgrund der höheren volumetrischen Dichte in verflüssigter Form in einem kryogenen Tank. Sowohl der erdgas- als auch

der dieselbetriebene Terminaltraktor wurden im regulären Betriebsalltag auf dem Hafenterminal am Duisburger Hafen eingesetzt.

Die Reachstacker – auch Containerstapler genannt – werden für die Aufnahme und den Transport von Containern auf dem Hafengebiet eingesetzt. Sie besitzen einen hydraulisch höhenverstellbaren Hubarm mit wiederum einem hydraulisch verstellbaren Greifer. Durch diesen Greifer sind sie in der Lage, Container mit unterschiedlichen Abmaßen anzuheben, zu verfahren und abschließend wieder abzusenken. Aufgrund der dazu erforderlichen hohen mechanischen Leistungsanforderung wurde im Forschungsprojekt für eine Maschine des Typs Reachstacker ein Diesel-/Erdgas-Misch-Betrieb erprobt. Dabei wird das Erdgas mit der angesaugten Luft vermischt, im Brennraum verdichtet und anschließend das Gemisch durch das Einspritzen von Dieselkraftstoff gezündet. Wegen der Beimischung von Erdgas in die Frischluft kann die Menge an Dieselkraftstoff gegenüber einem ausschließlichen Dieselbetrieb gesenkt werden, so dass Dieselkraftstoff durch den Einsatz des Erdgases substituiert werden kann. Die Höhe der Substitution wird auch als Substitutionsrate durch das Verhältnis der im Kraftstoff gebundenen Energie des eingesetzten Erdgases an der in den Kraftstoffen gebundenen Energie des eingesetzten Dieselkraftstoffes und Erdgas beschrieben [11]. Als Verbrennungsmotor wird der reguläre Dieselmotor verwendet, so dass der Motorbetrieb sowohl durch den Misch-Betrieb als auch rein konventionell nur mit Dieselkraftstoff vollzogen werden kann. Dementsprechend kann anwendungsspezifisch zwischen einem reinen Diesel- und einem Mischbetrieb reversibel umgeschaltet werden, so dass an einer Maschine ein direkter Vergleich der Antriebe möglich ist. Zur Erprobung des Misch-Betriebs wurde ein bestehender konventio-

nell dieselbetriebener Reachstacker durch einen Dienstleister erweitert und umgerüstet. Der Reachstacker wird durch einen Dieselmotor nach Emissionsklasse EU STAGE IIIA angetrieben. Die Speicherung des Erdgases wurde auch im Fall des Reachstacker aufgrund der hohen volumetrischen Dichte in verflüssigter Form in einem kryogenen Tank vollzogen. Der umgerüstete Reachstacker wurde während der Laufzeit des Forschungsprojektes sowohl im Misch- als auch im reinen Dieselbetrieb untersucht.

Feldversuch

Der erdgas- und dieselbetriebene Terminaltraktor sowie der Reachstacker im Diesel- und Diesel-/Erdgas-Mischbetrieb wurden während des Betriebsalltags auf dem Hafenterminal eingesetzt. Dabei musste die Versuchsdurchführung mit Rücksicht auf den Alltagsbetrieb vollzogen werden, damit dieser

minimal beeinträchtigt wurde. Um den Betrieb der Hafenumschlaggeräte mit dem alternativen Kraftstoff Erdgas zu beurteilen, wurden diese während des Feldversuchs messtechnisch begleitet und wissenschaftlich untersucht. Dazu wurden Datenlogger in die Führer*innenkabine der Maschinen installiert, die über eigene Sensoren verfügen und zusätzlich eine Anbindung an den Daten-Bus (CAN-Bus nach Netzwerkprotokoll SAE J1939) der Steuergeräte der Maschinen aufweisen. Durch die Anbindung an den Daten-Bus wurde unter anderem die Geschwindigkeit der Maschinen, die Motordrehzahl und das -moment, der Kraftstoffbedarf, die Menge an Frischluft und der Massenstrom an zurückgeführtem Abgas aufgezeichnet. Die Sensoren erfassten in erster Linie die vorherrschenden Umgebungsbedingungen wie die Außentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und den Luftdruck. Für die Messung der ausgestoßenen Emissionen wurden

zusätzlich zu den Datenloggern Abgasanalysegeräte genutzt und auf den jeweiligen Maschinenaufbau installiert. Dabei wurden Abgasanalysegeräte des Typs *j2kenpro* des Herstellers *ecom GmbH* verwendet. Die Abgasanalysegeräte messen über eine Messsonde am Abgasendrohr die volumetrischen Konzentrationen der Bestandteile CO_2 , CO , NO_x , CH_4 und SO_2 im trockenen Abgas. Dafür wird das feuchte Abgas durch einen Peltier-Kühler geleitet und das entstehende Kondensat ausgeschieden. Zusätzlich besitzen die Abgasanalysegeräte einen Feinstaubfilter, an dem optisch der Ausstoß von Ruß und Feinstaub untersucht werden kann. Während des Feldversuchs wurden wiederholt Einzelmessungen an den Maschinen durchgeführt. Insgesamt konnten, auch beeinflusst durch Ausfallzeiten und Reparaturen, Messzeiten von 27,3 Stunden für den erdgasbetriebenen Terminaltraktor, 14,1 Stunden für den dieselbetriebenen



Dieter Schramm. Foto: Daniel Schumann

Terminaltraktor, 9,3 Stunden für den Reachstacker im Diesel-/Erdgas-Mischbetrieb und 2,7 Stunden im Dieseltreib des Reachstackers aufgezeichnet werden. Die erhobenen Rohdaten wurden einer weiteren Datenaufbereitung und -filterung unterzogen. Dabei wurden unter anderem nach den Methoden aus den europäischen Verordnungen (EU) 2017/654 und (EU) 2017/655 die massebezogenen Abgasbestandteile aus den gemessenen Volumenkonzentrationen der Abgasbestandteile ermittelt [12,13]. Da das Abgas am Abgasrohr des Abgastaktes durch die Messsonde des Abgasanalysergerätes aufgenommen wurde und weiterhin noch einen Messschlauch bis hin zum Abgasanalysergerät passieren musste, existierte ein zeitlicher Versatz zwischen den Messungen des Motorbetriebs und der Emissionsbestandteile. Dieser wurde im Vorfeld der Ermittlung der massebezogenen Abgasbestandteile in Anlehnung an die zuvor genannten Verordnungen durch eine Kreuzkorrelation korrigiert. Ausgehend von den bestimmten massebezogenen Emissionsausstößen und der übrigen Datengrundlage wurden unter ande-

rem die spezifischen Emissionsausstöße ermittelt. Bei der spezifischen Darstellung werden die Emissionsausstöße relativ zu der dabei umgesetzten mechanischen Arbeit an der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors ausgedrückt. Die mechanische Motorarbeit wird aus der aufgezeichneten Motordrehzahl- und dem Drehmoment berechnet. Da bei dem umgerüsteten Reachstacker nach erfolgter Umrüstung im Mischbetrieb keine validen Informationen über das Motordrehmoment erhoben werden konnte, erfolgt die Berechnung dessen spezifischer Kenngrößen anhand der eingesetzten kraftstoffgebundenen Energie. Diese kann – einen vergleichbaren Wirkungsgrad des Motorbetriebs im reinen Diesel- und Mischbetrieb vorausgesetzt – ebenfalls als Referenzmaßstab herangezogen werden. Sowohl die Emissionsmassen als auch die mechanische Motorarbeit wird für die gesamte Dauer einer Messung ermittelt. Somit beschreiben die spezifischen Kenngrößen die mittleren Emissionsausstöße während einer Messung.

Ergebnisse und Diskussion

Die auf die Motorarbeit beziehungsweise die eingesetzte kraftstoffgebundene Energie normierten Kenngrößen erlauben einen direkten Vergleich zwischen den Antriebsformen der jeweiligen Maschine. Durch den identischen Referenzwert einer Kilowattstunde mechanischer Arbeit an der Kurbelwelle kann die Effizienz der Terminaltraktoren hinsichtlich des Ausstoßes an Emissionen gegenübergestellt werden. Anhand des Referenzwertes der gesamten eingesetzten kraftstoffgebundenen Energie lässt sich auch der spezifische Emissionsausstoß des Reachstackers in beiden Betriebsmodi beurteilen. Für jede Messung werden jeweils die zuvor genannten spezifischen Kenngrößen bestimmt. Da für jede Maschine eine Reihe an Messungen vollzogen wurden, existieren damit ebenso Messreihen beziehungsweise Verteilungen an den jeweiligen spezifischen Kenngrößen. Um diese Verteilungen direkt miteinander zu vergleichen und einen relativen beziehungsweise absoluten Unterschied ausmachen zu können,

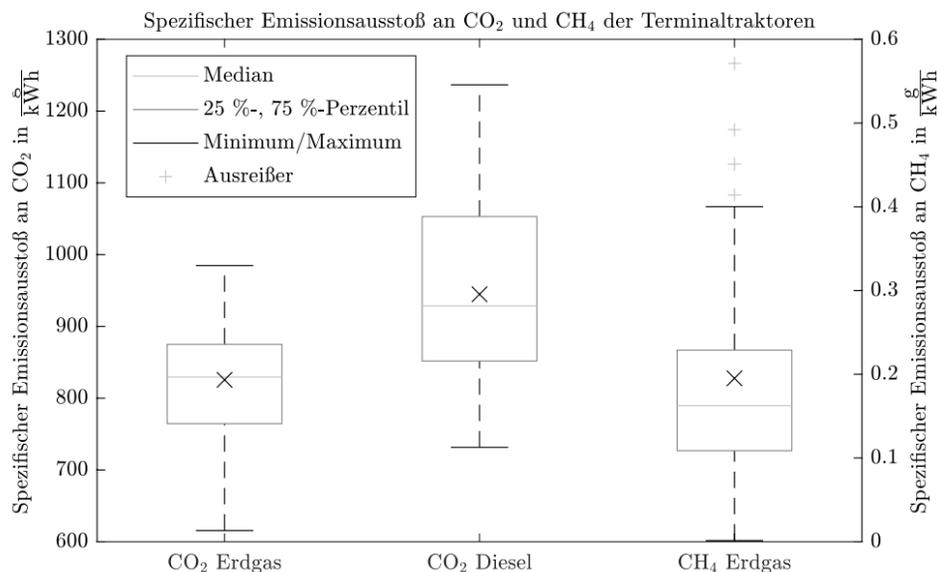
werden statistische Kennwerte der Verteilungen verwendet. Dabei wird der Median der jeweiligen Verteilung als Bezugsmaßstab für die Abschätzung von Potentialen herangezogen. Der Median des Dieseltreibs dient als Referenzmaßstab für relative Differenzen.

Auf Seiten der Maschinen des Typs Terminaltraktor werden die Ergebnisse der Messungen und Datenaufbereitung des Feldversuchs für die erdgas- und dieseltreibene Maschine bewertet (vgl. Abb. 3, 4). Der spezifische CO_2 -Ausstoß des Erdgas-Terminaltraktors beträgt etwa 829,4 g CO_2 pro kWh mechanischer Arbeit. Der Diesel-Terminaltraktor emittiert dagegen 928,5 g pro kWh und damit etwa 10,7 Prozent mehr als die erdgasbetriebene Maschine. Auch nach Berücksichtigung des spezifischen Ausstoßes an Methan von etwa 0,163 g/kWh durch den Erdgas-Terminaltraktor und den daraus folgenden 28-fach höheren CO_2 -Äquivalent von ungefähr 4,6 g/kWh folgt immer noch eine Reduktion von etwa 10,2 Prozent. Bezüglich der spezifischen Ausstöße an Luftschadstoffen kann ebenfalls eine Reduktion beim

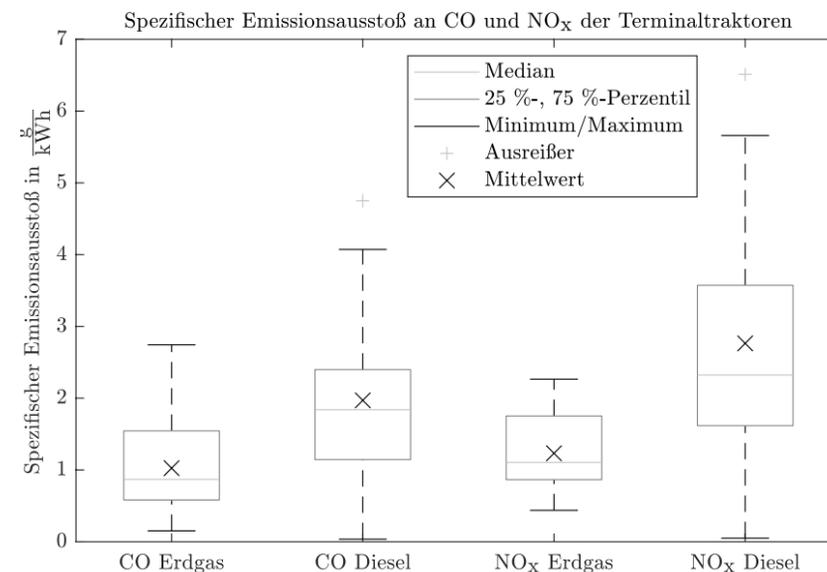
Erdgasbetrieb gegenüber dem Dieseltreib ausgemacht werden. So beträgt der Median der Verteilungen der spezifischen Emissionen an Luftschadstoffen des Erdgas-Terminaltraktors 0,87 g/kWh für CO und 1,1 g/kWh für NO_x . Für den Diesel-Terminaltraktor belaufen sich diese auf 1,84 g/kWh für CO und 2,32 g/kWh für NO_x . Daraus folgt, dass die spezifischen Emissionen der Luftschadstoffe des Diesel-Terminaltraktors jeweils um mehr als 50 Prozent übersteigen. Der spezifische Ausstoß an SO_2 konnte sowohl für den Erdgas- als auch für den Diesel-Terminaltraktor als vernachlässigbar gering eingestuft werden. Die Bewertung des Feinstaubausstoßes erfolgt anhand von zwei Feinstaubfiltern, die während den Messungen der beiden Terminaltraktoren im Abgasanalysergerät eingesetzt waren. Während der Feinstaubfilter des Diesel-Terminaltraktors eine merkliche Schwärzung aufwies, konnte beim Erdgas-Terminaltraktor keine Einfärbung erkannt werden. Dies lässt darauf schließen, dass der Erdgas-Terminaltraktor signifikant geringer Feinstaub und Ruß verur-

sacht beziehungsweise emittiert als der Diesel-Terminaltraktor.

Auf Seiten des Reachstackers erfolgt die Bewertung in Abhängigkeit der durchschnittlichen Substitutionsrate während einer Messung (vgl. Abb. 5 und Abb. 6). Diese drückt aus, wie hoch der mittlere energetische Anteil von Erdgas an der gesamten eingesetzten kraftstoffgebundenen Energie während einer Messung war. Zur Berücksichtigung der kraftstoffgebundenen Energie werden für den Dieseltreibstoff ein Heizwert von 42,5 MJ/kg und für das eingesetzte Erdgas ein Heizwert von 49,6 MJ/kg angenommen [11]. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender durchschnittlicher Substitutionsrate die spezifischen CO_2 -Emissionen pro kWh an kraftstoffgebundener Energie sinken. Dabei überschreitet der spezifische CO_2 -Ausstoß bei reinem Dieseltreib mit einer durchschnittlichen Substitutionsrate von 0 Prozent dem eines Mischbetriebs bei einer durchschnittlichen Substitutionsrate von etwa 27 Prozent um etwa 10 Prozent. Dieser Vorteil kann jedoch durch den spezifischen CH_4 -Ausstoß, der



(3) Spezifischer CO_2 - und CH_4 -Ausstoß der Terminaltraktoren
Quelle: eigene Darstellung



(4) Spezifischer CO- und NO_x -Ausstoß der Terminaltraktoren
Quelle: eigene Darstellung

mit zunehmender durchschnittlicher Substitutionsrate zunimmt, egalisiert werden. Im Mittel werden etwa 2,95 g CH₄ pro kraftstoffgebundener Kilowattstunde emittiert, was einem CO₂-Äquivalent von etwa 82,6 g entspricht. Bei den Luftschadstoffen treten zwei gegensätzliche Tendenzen auf. Während der spezifische NO_x-Ausstoß mit ansteigender durchschnittlicher Substitutionsrate tendenziell sinkt, steigt der spezifische CO-Ausstoß an. Für beide Betriebsmodi gilt, dass der spezifische Ausstoß an SO₂ vernachlässigbar gering ist. Der Anstieg des spezifischen Methanschlupfes und der spezifischen CO-Emissionen lässt auf eine Zunahme an unvollständigen Verbrennungen bei zunehmender durchschnittlicher Substitutionsrate schließen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass das Motorsteuergerät sowie die Abgasnachbehandlung ursprünglich auf einen Dieselbetrieb optimiert wurde. Durch zukünftige technische Optimierungen könnte dahingehend Abhilfe geschaffen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Europäische Union hat das Ziel, vorhandene und neue Strukturen der Mobilität effizienter und ökologischer zu gestalten. Ansätze, dieses zu erreichen, sind die Elektromobilität, eine Hybridisierung oder alternative Kraftstoffe. Im beschriebenen Projekt *LeanDeR* wurden die Umweltauswirkungen des alternativen Kraftstoffs Erdgas bei Hafenumschlaggeräten untersucht. Es handelte sich um einen rein durch Erdgas betriebenen Terminaltraktor und einen Reachstacker, der mit einem Diesel-Erdgas-Mischbetrieb ausgerüstet wurde. Bei beiden Maschinen wurde der konventionelle Dieselantrieb den genannten alternativen Antrieben als Vergleichsmaßstab gegenübergestellt. Während eines Feldversuchs wurden unter anderem der spezifische Emissionsausstoß der Abgasbestandteile CO₂, CO, NO_x, CH₄ und SO₂

bewertet. Dabei zeigte sich, dass bei einem Erdgasbetrieb der spezifische CO₂-Ausstoß beim Terminaltraktor trotz Methanschlupf um etwa zehn und der spezifische CO-, NO_x-Ausstoß um ungefähr fünfzig Prozent gegenüber dem spezifischen Emissionsausstoß im Dieselpetrieb gesenkt werden konnte. Zudem war der Feinstaubausstoß im Erdgasbetrieb wesentlich geringer. Beim Reachstacker nahm der spezifische CH₄-Ausstoß im Mischbetrieb mit zunehmendem Substitutionsanteil von Erdgas merklich zu, was mögliche Einsparungen hinsichtlich der spezifischen CO₂-Emissionen egalieren kann. Im Mischbetrieb sank der spezifische NO_x-Ausstoß mit zunehmender Substitutionsrate von Erdgas. Gleichwohl führte eine Erhöhung der Substitutionsrate zu einer Erhöhung der spezifischen CO-Emissionen. Dieses Verhalten kann möglicherweise darauf zurückgeführt werden, dass das Motorsteuergerät auf den Dieselpetrieb optimiert wurde.

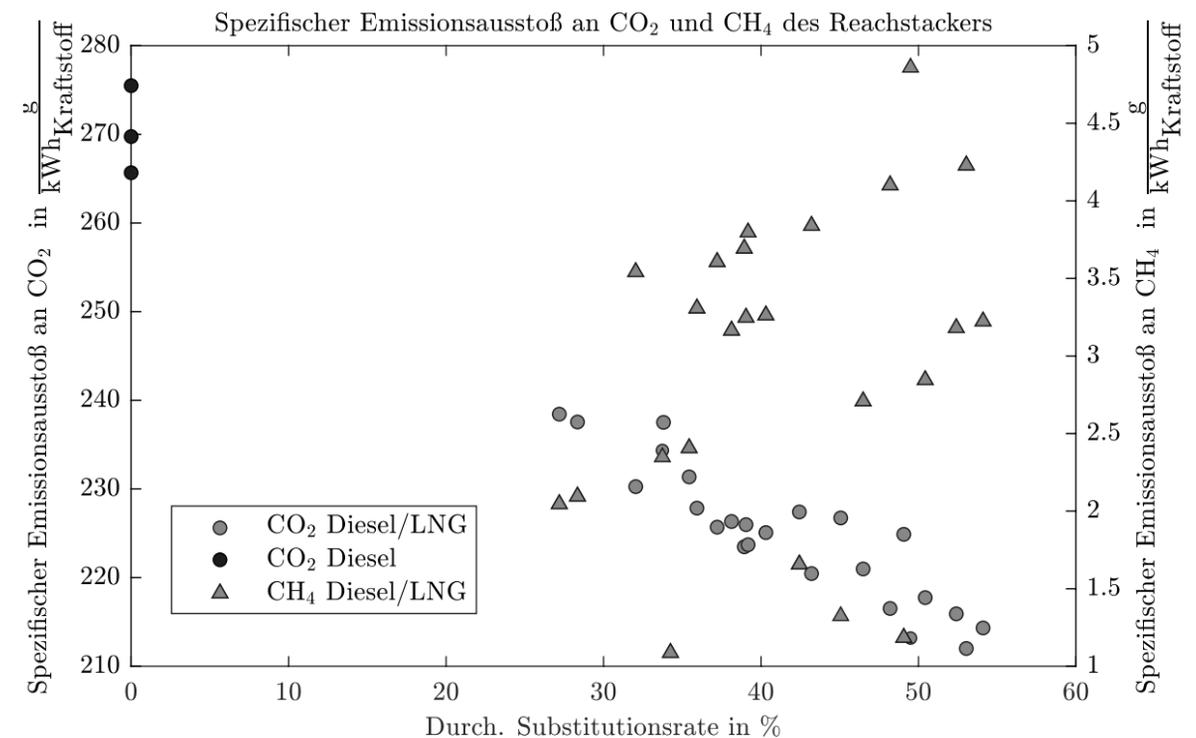
Es konnte gezeigt werden, dass die praktische Nutzung von LNG als alternativer Kraftstoff mit den damit verbundenen vorteilhaften Umweltauswirkungen möglich ist. Es zeigte sich auch, dass idealerweise ein reiner Erdgasmotor eingesetzt werden sollte. Grundsätzlich ist eine Umrüstung von bestehenden Dieselmotoren auf einen Kraftstoffmischbetrieb möglich und besitzt ebenfalls Potential. Es besteht jedoch die Gefahr, dass zum Beispiel durch fehlende technische Abstimmungen wie dem Motorsteuergerät viele Vorteile egalisiert werden.

Summary

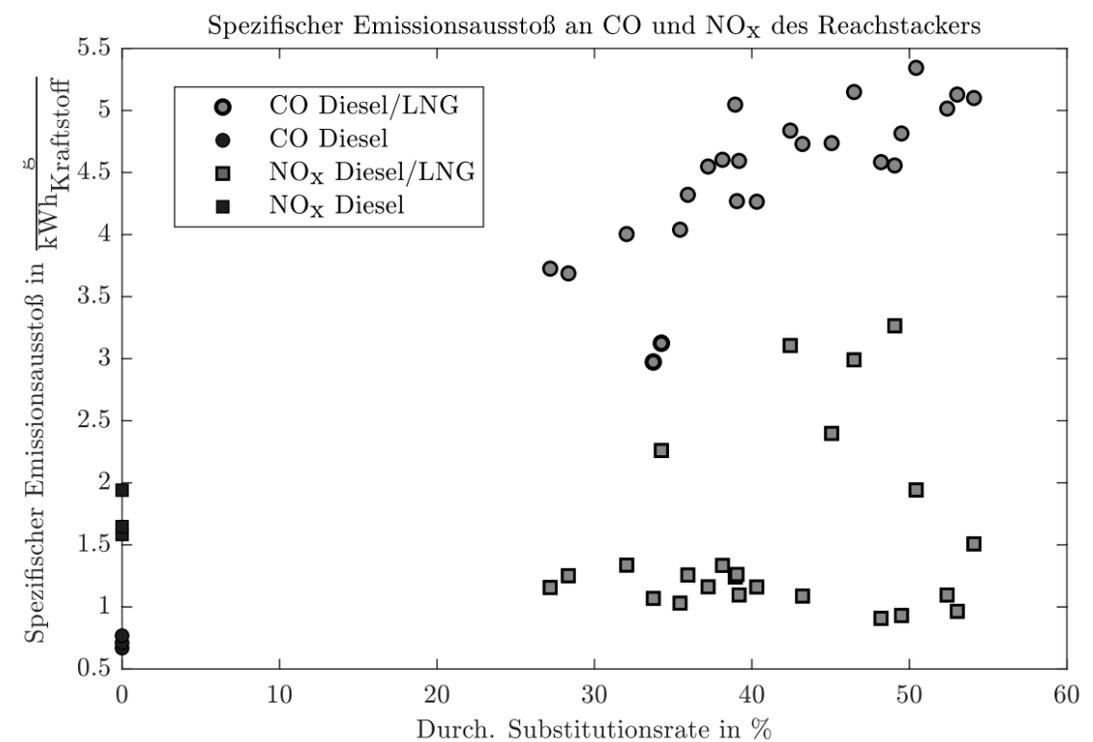
The European Union aims to make existing and new mobility structures more efficient and more ecological. Approaches to achieve this include electromobility, hybridisation or alternative fuels. In the project *LeanDeR* described in this

article, the environmental impact of the alternative fuel natural gas was investigated for use with port handling equipment. This involved a terminal tractor powered purely by natural gas and a reach stacker fuelled by a combination of diesel and natural gas. For both machines, the conventional diesel drive was used as a benchmark for comparison with the aforementioned alternative drives. During a field test, the specific emissions of the exhaust gas components CO₂, CO, NO_x, CH₄ and SO₂ were evaluated. The results showed that, in the case of natural gas operation, the specific CO₂ emissions of the terminal tractor could be reduced by approximately 10% and the specific CO and NO_x emissions by approximately 50% compared to the specific emissions in diesel operation, although methane slip occurred. In addition, particulate emissions were significantly lower in natural gas operation. In the case of the reach stacker, the specific CH₄ emissions in mixed operation increased noticeably with the increasing substitution share of natural gas, which can neutralise possible savings in terms of specific CO₂ emissions. In mixed operation, the specific NO_x emission decreased with an increasing substitution rate of natural gas. Nevertheless, an increase in the substitution rate led to an increase in specific CO emissions. This behaviour can possibly be attributed to the fact that the engine control unit was optimized for diesel operation.

It is shown that the practical use of liquefied natural gas as an alternative fuel with the associated beneficial environmental effects is possible. It is also shown that ideally a pure natural gas engine should be used. In principle, the conversion of existing diesel engines to mixed-fuel operation is possible and has potential. However, there is a risk that many advantages will be cancelled out, for example due to missing technical adjustments such as the engine control.



(5) Spezifischer CO₂- und CH₄-Ausstoß des Reachstackers
Quelle: eigene Darstellung



(6) Spezifischer CO- und NO_x-Ausstoß des Reachstackers
Quelle: eigene Darstellung

Amerkungen/Literatur

- [1] Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission – Der europäische Grüne Deal, COM(2019) 640 final vom 11.12.2019, 2019.
- [2] Europäische Kommission: Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September 2016. In: Amtsblatt der Europäischen Union L 252 (2016), S. 53–117.
- [3] Geimer, M.; Pohlandt, C.: Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. KIT Scientific Publishing, 2014. – ISBN 978-3-7315-0188-6
- [4] Helms, H.; Jamet, M.; Heidt, C.: Renewable fuel alternatives for mobile machinery, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2017, p. 43.
- [5] Troncon, D.; Alberti, L.; Bolognani, S.; Bettella, F.; Gatto, A.: Electrification of agricultural machinery: a feasibility evaluation, 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2019, pp. 1–7.
- [6] Figer, G., in: R. van Basshuysen (Ed.), Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, pp. 397–424.
- [7] Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen: LeanDeR – LNG URL <https://www.uni-due.de/mechatronik/forschung/leanderlng>.
- [8] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 16903: Erdöl- und Erdgasindustrie – Eigenschaften von Flüssigerdgas mit Einfluss auf die Auslegung und die Materialauswahl, 2015.
- [9] Adalbert Wolany; Bargende, M., in: R.v. Basshuysen (Ed.), Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. Wege zur klimaneutralen Mobilität, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, pp. 51–66.
- [10] Sabine Feldpausch-Jaegers; Nadine Lefort; Manfred Lange; Alexey Mozgovoy; Frank Burmeister; Marco Henel; Anja Wehling; Enrico Schuhmann; Ronny Erler; Johannes Ruf; Wolfgang Köppel; Dietrich Gerstein; Brandes, F.: Studie „Potenzialanalyse LNG – Einsatz von LNG in der Mobilität, Schwerpunkte und Handlungsempfehlungen für die technische Umsetzung“ Bonn, 2016.
- [11] Driesch, P.; Spengler, A.; Schramm, D.; Malkwitz, A., Forschungsprojekt LeanDeR, 2020.
- [12] Europäische Kommission: Delegierte Verordnung (EU) 2017/654 der Kommission vom 19. Dezember 2016. In: Amtsblatt der Europäischen Union L102 (2017), S. 1–333.
- [13] Europäische Kommission: Delegierte Verordnung (EU) 2017/655 der Kommission vom 19. Dezember 2016. In: Amtsblatt der Europäischen Union L102 (2017), S. 334–363.

Die Autoren

Patrick Driesch arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen. Er studierte von 2010 bis 2016 Maschinenbau mit der Vertiefung Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen. Seit seinem Abschluss ist er am Lehrstuhl für Mechatronik als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Er beschäftigt sich mit der Evaluierung von alternativen Antrieben und untersucht forschungsseitig die simulationsgestützte Analyse und Bewertung von Antriebsstrangkonzepthen auf Basis realer Fahrdaten. Dazu war er in unterschiedlichen Forschungsprojekten wie PREMIUM, RUHRAUTOe sowie LeanDeR tätig, in denen er sich mit Kraftfahrzeugen und mobilen Maschinen auseinandersetzte.

Arnim J. Spengler war bis Juni 2021 am Institut für Baubetrieb und Baumanagement an der Universität Duisburg-Essen tätig. Er studierte Bauingenieurwesen in Münster und Essen. Von 2008 bis 2015 war Arnim Spengler in der Bauleitung tätig, ab 2016 im Multiprojektmanagement des EffizienzClusters Logistik Ruhr. Bis 2021 war er in mehreren Forschungsprojekten an der Universität Duisburg-Essen aktiv, unter anderem im Projekt LeanDeR, Urban Factory und anschließend in der Roboterforschung im Bauwesen. Seit 2019 ist er Teil der Projektgruppen innovatives Bauen und BIM Competence Center beim Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen. Seit 2017 ist er Mitgründer und CTO des Construction Tech Start-up BuildersMind. Schwerpunkte seiner Tätigkeit sind die Methode Building Information Modeling (BIM) und der Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Robotik im Bauwesen.

Alexander Malkwitz leitet das Institut für Baubetrieb und Baumanagement an der Universität Duisburg-Essen. Schwerpunkte seiner Arbeit sind die Optimierung von projektorientierten Geschäften insbesondere die Erarbeitung von Wachstumsstrategien, die Betreuung von Merger- und Akquisitionsprozessen, von operativen Verbesserungen insbesondere auch der Optimierung von Projektmanagementprozessen für Unternehmen in Deutschland und Europa. Vor seiner universitären Tätigkeit war er bei einer internationalen Top-Management-Beratung als Partner sowie bei einem Baukonzern als Bauleiter und Projektleiter tätig, vornehmlich für Projekte in der Chemieindustrie wie im Kraftwerksbau. Alexander Malkwitz hat in München Bauingenieurwesen und Wirtschaftsingenieurwesen studiert. Neben seiner Professur an der Universität Duisburg-Essen ist er als Industrieberater tätig.

Dieter Schramm ist Leiter des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen und Dekan der Ingenieurwissenschaften. Er studierte von 1974 bis 1980 Mathematik in Stuttgart, war von 1981 bis 1986 wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl B für Mechanik der Universität Stuttgart und

promovierte dort 1986 zum Dr.-Ing. Von 1986 bis 1992 arbeitete er als Gruppenleiter Simulationstechnik bei der Robert Bosch GmbH in Stuttgart und leitete dort von 1992 bis 1997 die Abteilung „Neue Systeme“ sowie von 1997 bis 1999 die Hauptabteilung Neuentwicklung Starter. Danach war Dieter Schramm von 1999 bis 2001 Entwicklungsleiter bei Tyco Electronics und ab 2001 Geschäftsführer und Produktbereichsleiter Mechatronische Produkte bei der Tyco Electronics Pretema GmbH, Pforzheim. Seit Oktober 2004 hat er die Professur und das Fachgebiet Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen inne. Seit 2006 ist er Dekan der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen und seit 2007 Vorsitzender des Verwaltungsrates des IUTA. Im Jahr 2024 verlieh ihm die Universität Miskolc die Ehrendoktorwürde. Neben seiner Professur an der Universität Duisburg-Essen ist Dieter Schramm Mitgründer und Partner mehrerer Unternehmen im Bereich der wissenschaftlichen Aus- und Fortbildung.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/78100

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20230331-150911-2

Erschienen in: UNIKATE 59 (2023), S. 116-127

Alle Rechte vorbehalten.