

Potenziale der Binnenschifffahrt zur Verbesserung des Klimaschutzes

Christian Noss und Christoph Heinzelmann

Zusammenfassung

Damit die ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung erfüllt werden, müssen die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor drastisch sinken. Das Klimaschutzgesetz 2021 macht hierfür verbindliche Vorgaben. Danach darf der Verkehrssektor im Jahr 2030 nur noch 85 Mio. t CO₂ emittieren, was etwa einer Halbierung der derzeitigen Emissionen entspricht. Hierzu kann die Güterverlagerung von LKW auf die schon heute klima- und umweltfreundlichen Binnenschiffe einen wirkungsvollen Beitrag leisten. Trotz dieser Vorteile gilt es, Verbesserungspotenziale der Binnenschiffstransporte zu ermitteln und zeitnah umzusetzen.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) fokussiert in ihren laufenden Untersuchungen auf betriebliche Minderungsmaßnahmen, die Schiffsführer und Logistiker bei einer möglichst klima- und umweltfreundlichen Fahrweise und Transportplanung unterstützen sollen. Um die Wirkung der Maßnahmen für den Klimaschutz quantitativ zu erfassen, entwickelt die BAW Emissionsmodelle. On-board-Messungen im realen Schiffsbetrieb liefern die hierzu notwendigen Emissionsdaten.

Der vorliegende Beitrag verdeutlicht anhand von zwei Beispielen, wie sich zukünftig der Treibstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen der Binnenschifffahrt durch eine intelligente Schleusenzulaufsteuerung und ein Reiseunterstützungssystem reduzieren lassen. Anhand von einfachen Szenarien auf einem freifließenden Fluss (Rhein) und auf einer Kanalstrecke mit mehreren Schleusen (Wesel-Datteln-Kanal) wurden 8,4 % bzw. 36 % geringere Verbräuche und Emissionen ermittelt. Die bisherigen Emissionsmessungen bestätigen die im Modell verwendeten Faktoren für den Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen.

1 Einleitung

Die Folgen des anthropogen bedingten Klimawandels sind zunehmend auch in Deutschland zu spüren. Meteorologische Naturereignisse, wie Hitze, Trockenheit und Überschwemmungen, haben zuletzt an Intensität und Häufigkeit zugenommen. Beispiele hierfür sind die Flutkatastrophe in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen im Sommer 2021, die zu großem menschlichen Leid und hohen materiellen Schäden geführt hat, und die monatelang anhaltende Trockenheit in den Jahren 2018 (BfG 2019, IKS 2020) und 2022, die die Schifffahrt auf dem Rhein nahezu zum Erliegen gebracht hat.

Der Weltklimarat verweist in seinem Sonderbericht (IPCC 2018) auf die Notwendigkeit, die Emissionen der Treibhausgase (THG) deutlich zu reduzieren, um die globale Erwärmung auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen. Dieser Wert spezifiziert das mit dem Pariser Klimaabkommen (UN, 2015) festgelegte Ziel, irreversible Folgen durch klimatische Rückkopplungseffekte abzuwenden. Auf nationaler Ebene setzt das Klimaschutzgesetz 2021 (KSG, 2021) diese Ziele in rechtlich verbindliche Grenzwerte für CO₂-Emissionsraten um. So darf im Vergleich zum CO₂-Ausstoß von 1990 ab 2030 nur noch 35 % und ab 2040 nur noch 12 % emittiert werden. Ab dem Jahr 2045 gilt die THG-Neutralität, d. h. es darf nur noch so viel CO₂ freigesetzt werden, wie sich durch Photosynthese und eventuell technische Maßnahmen binden lassen. Ab 2050 soll die THG-Bilanz größere Senken als Quellen aufweisen.

Die notwendige Reduzierung der THG-Emissionen ist im Trend der Jahre 2000 bis 2021 allerdings nicht zu erkennen (Expertenrat, 2022). Besonders gering fällt die Minderungsrate im Verkehrssektor mit nur 0,5 Mio. t/a aus. Um die zulässige CO₂-Gesamtemission des Jahres 2030 (85 Mio. t) nicht zu überschreiten, hätte für denselben Zeitraum eine Minderung um 7 Mio. t/a erfolgen müssen. Vor dem Hintergrund, dass 97 % der verkehrsbedingten Emissionen dem Straßenverkehr zuzurechnen sind, wird klar, dass allein die angestrebte Elektrifizierung der Kraftfahrzeugflotte nicht ausreichen wird. Eine grundlegende Mobilitätswende ist erforderlich. Im Güterverkehr kann eine Transportverlagerung von LKW auf klima- und umweltfreundliche Binnenschiffe einen wirkungsvollen Beitrag leisten (BMVI 2019). Auch die Bahn gilt als ein besonders klima- und umweltfreundliches Verkehrsmittel. Allerdings befindet sich das Schienennetz bereits heute an seiner Kapazitätsgrenze. Dagegen verfügt das Wasserstraßennetz bundesweit noch über erhebliche freie Kapazitäten.

Zwei grundlegende Eigenschaften kennzeichnen die Klimafreundlichkeit der Binnenschifffahrt und begründen die dringend notwendige Verkehrsverlagerung:

1. Im Vergleich zu LKW und Bahn ist die Transporteffizienz eines Schiffes, d. h. der Leistungsbedarf je Transportmenge und -strecke, am günstigsten (Krueger 2009, PLANCO 2007).
2. Die technische Nutzungsdauer von Binnenschiffen ist im Vergleich zu LKW und Bahn mit Abstand am längsten (GDWS 2019, Statista 2022, DIW 2022).

Beide Aspekte wirken sich positiv auf die Reduzierung des verkehrsbedingten Ressourcenverbrauchs und der THG-Emissionen aus. Trotz dieser Vorteile gilt es auch in der Binnenschifffahrt, alle Potenziale zur Emissionsminderung auszuschöpfen. Neben zahlreichen schiffs- bzw. antriebstechnischen Maßnahmen zur Minderung und Vermeidung von THG-Emissionen (CLINSH 2021) sind betriebliche Maßnahmen für das Verkehrssystem Schiff/Wasserstraße zu entwickeln. Diese haben das Ziel, sowohl die Transporteffizienz als auch die Zuverlässigkeit der Binnenschifffahrt und damit die Konkurrenzfähigkeit gegenüber den anderen Verkehrsmitteln zu verbessern.

Als wissenschaftlicher Dienstleister auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus sowie als Ressortforschungseinrichtung des Bundes kann die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) die Ziele eines nachhaltigen Gütertransports auf der Wasserstraße wirkungsvoll unterstützen. Im Jahr 2021 hat die BAW eine neue „Forschungsstrategie Verkehrswasserbau“ entwickelt. Die Verbesserung des Klimaschutzes sowie die Anpassung des Verkehrssystems Schiff/Wasserstraße an den Klimawandel spielen darin eine wichtige Rolle.

Der vorliegende Beitrag beschreibt anhand von zwei Beispielen schnell umsetzbare betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung von Treibstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen der Binnenschifffahrt (Kap. 2). Technische Änderungen der Schiffsantriebe, z. B. durch die Umstellung auf regenerative Energieträger, werden nicht betrachtet. Darüber hinaus werden Methoden in Form von Modellen und Messungen zur Erfassung und Bewertung der Emissionen vorgestellt (Kap. 3). Diese helfen bei der Identifikation besonders zielführender Maßnahmen sowie beim Monitoring der Emissionsminderung auf dem Weg zur anvisierten Neutralität.

2 Betriebliche Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen

2.1 Intelligente Schleusenzulaufsteuerung

Schleusen dienen der Überwindung von Höhendifferenzen in Kanälen und staugeregelten Flüssen. In Schleusenketten können komplexe Zielkonflikte der Schleusungsrangfolgen bestehen, da die Minimierung der Wartezeit an einer Schleuse zu erheblich längeren Wartezeiten an benachbarten Schleusen führen kann. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „intelligente Schleusenzulaufsteuerung“ (iSZS) der BAW ist es, die Schleusungsrangfolgen in Stauhaltungsketten so zu optimieren, dass Gesamtwarezeit und Stauwahrscheinlichkeit möglichst gering werden. Dadurch werden ein emissionsintensiver Stop-and-Go-Betrieb sowie lange Wartezeiten mit laufendem Motor an den Schleusen vermieden.

Darüber hinaus bietet die iSZS dem Schleusenpersonal die Möglichkeit, den Schiffsführern frühzeitig die erwünschten Ankunftszeiten (engl. Requested Time of Arrival, RTA) mitzuteilen, die ihrerseits in Kenntnis der RTA ihre Fahrt durch eine angepasste Geschwindigkeit oder einen späteren Start ressourcenschonend gestalten können. Ting und Schonfeld (1999) wiesen bereits nach, dass signifikante Einsparungen an Treibstoff und damit an Kosten und THG-Emissionen möglich sind, wenn infolge absehbarer Schleusenstaus die Zulaufgeschwindigkeit der Schiffe in den Stauhaltungen reduziert wird.

Die Grundlage für die Optimierung der Schleusungsrangfolge und RTA-Mitteilung ist eine präzise Abschätzung der erwarteten Ankunftszeit (engl. Expected Time of Arrival, ETA), die aufgrund individueller Entscheidungen der Schiffsführer von rein fahrdynamisch basierten Zeiten deutlich abweichen kann. Mit Hilfe von neuronalen Netzen entwickelt die BAW Methoden, die zu einer performanten ETA-Bestimmung und optimalen Schleusungsrangfolge führen. Die Entwicklung und Validierung der Methoden erfolgt in einer virtuellen Testumgebung, in der verschiedene Situationen unter Verwendung des im Pilotbetrieb befindlichen Schleusenmanagementsystems der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie eines Schiffs- und Schleusensimulationsmodells (Noss et al. 2020) analysiert werden. So lässt sich der Erfolg von Methoden und Maßnahmen zur Reduzierung von Wartezeiten vor Schleusungen bewerten, bevor diese im realen Betrieb Anwendung finden (Abb. 1).

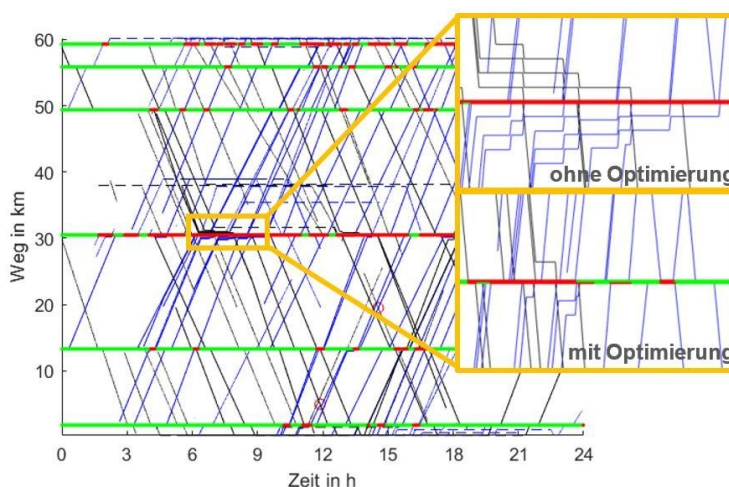


Abb. 1 Simulation von Schiffsverkehr (blau: Bergfahrer, schwarz: Talfahrer) und Schleusungen (grün: freie, rot: belegte Schleuse) einer Schleusenkette. Die Insets (orange) zeigen einen Detailausschnitt mit Wartezeiten an der 3. Schleuse, aus Heinzelmann und Noss (2022)

2.2 Reiseunterstützung für die Binnenschifffahrt

In Kooperation mit externen Partnern entwickelt die BAW aktuell ein Assistenzsystem zur „Reiseunterstützung für die Binnenschifffahrt“ (RUBIN), das der Optimierung von Transportprozessen und der Reduzierung von THG-Emissionen dient. Dem Reeder bzw. Schiffsführer werden Empfehlungen zum Zeit- und Ladungsmanagement unterbreitet, die u. a. die maximal mögliche Abladetiefe und den weiteren zeitlichen Reiseverlauf beinhalten. Mit diesen Empfehlungen und zusätzlichen Angaben lassen sich ressourcenschonende Wasserstraßentransporte vor Fahrtbeginn planen und während der Reise durch eine weit vorausschauende Fahrweise realisieren. Als Sekundärziel von RUBIN ist eine verbesserte Planbarkeit der Binnenschiffstransporte zu nennen, mit der Logistiker die Wasserstraße stärker in intermodale Prozesse einbinden können.

Die Reisedaten in RUBIN basieren auf Prognosen für Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten und den Schiffsverkehr sowie auf Informationen zu Einschränkungen entlang der vorgeschlagenen Routen. Hierfür werden mehrtägige Strömungsprognosen auf Basis von zweidimensional hydrodynamisch-numerischen (HN) Modellierungen und Verkehrsprognosen durch Mikro-Verkehrsmo- dellierungen auf dem gesamten Wasserstraßennetz entwickelt. Die HN-Modellierungen nutzen Pegelprognosen und Wasserhaushaltsmodelle der Bundesanstalt für Gewässerkunde, die eine Vorausschau über mehrere Tage ermöglichen. Aus den Verkehrs- und Strömungssimulationen lassen sich optimale schiffsindividuelle Betriebszustände aufbereiten, die den Beteiligten der Logistikkette als Entscheidungshilfe dienen. Durch einen bidirektionalen Informationsfluss bietet sich perspektivisch die Möglichkeit, RUBIN mit der iSZS zu koppeln, was einen ökonomisch und ökologisch optimierten Verkehrsfluss fördern würde.

3 Erfassen und Bewerten von Binnenschiffsemissionen

3.1 Modellierungen

Um den Erfolg der zuvor genannten und weiterer Minderungsmaßnahmen hinsichtlich Treibstoffverbrauch und THG-Emissionen bewerten zu können, müssen sowohl der Status quo als auch die Wirkungsweise der Maßnahmen möglichst präzise abgeschätzt werden. Obwohl bereits einige Modelle (Corbett und Fischbeck 2000, Chen et al. 2017) und Messungen (Corbett und Robinson 2001, Pillot et al. 2016) zu Binnenschiffsemissionen existieren, sind aufgrund der vielfältigen Anwendungsfälle, Randbedingungen und neuerer Erkenntnisse weitere Modellentwicklungen und Messungen erforderlich. So lassen sich im Vergleich zu früheren Modellen, die auf verkehrsstatistischen Daten beruhen (z. B. Corbett und Fischbeck 2000), mittlerweile Emissionen direkt aus beobachteten Schiffsverkehren bestimmen (z. B. Chen et al. 2017).

Einen zu Chen et al. (2017) analogen Ansatz verfolgt die BAW mit einem Emissionsmodell (Abb. 2), das auf Daten des automatischen Identifikationssystems (AIS) beruht, die der BAW seit 2019 bundesweit zur Verfügung stehen. Diese beinhalten neben genauen Positionen und Geschwindigkeiten auch Angaben zu den Abmessungen und zur Identifikation der Binnenschiffe. Eine weitere Grundlage des Modells bilden die Informationen zu den Wasserstraßen, die sich aus Datenbankeinträgen zu Breiten, Tiefen und Profilformen in Kanälen sowie aus HN-Modellen der BAW zu Bathymetrie und Strömungsbedingungen in Flüssen gewinnen lassen. In Verbindung mit Pegelauzeichnungen kann so zu jeder beobachteten Schiffsposition die relative Geschwindigkeit durch das Wasser bestimmt werden. Fahrdynamische Ansätze liefern den Widerstand und die aufzubringende Leistung der Schiffe sowie mithilfe von leistungsspezifischen Faktoren deren Treibstoffverbrauch und Emissionen. Aus der Summe aller Emissionen entlang eines

Wasserstraßenabschnitts lassen sich über den Zeit- und Längenbezug der Beobachtungen längenspezifische Emissionsraten ableiten und kartieren. Neben der Analyse beobachteter Emissionsraten können auf diese Weise auch Emissionsraten für Szenarien mit Annahmen zu Emissionsminderungsmaßnahmen ermittelt werden.



Abb. 2 Grundlegende Struktur zur Modellierung von THG-Emissionsraten auf Binnenschiffahrtsstraßen, aus Heinzelmann und Noss (2022)

Zwei beispielhafte Anwendungen des Emissionsmodells sollen die Wirkungsweisen der iSZS und von RUBIN auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen verdeutlichen. Mit dem Szenario, dass ein auf 2,50 m abgeladenes Europaschiff auf dem Wesel-Datteln-Kanal zur Vermeidung einer insgesamt 1,5 Stunden dauernden Wartezeit vor den Schleusen mit 8 km/h anstelle von 10 km/h Reisegeschwindigkeit fährt, lassen sich 61 kg Treibstoff einsparen und 195 kg CO₂-Emission vermeiden. Dies entspricht einer Reduzierung um jeweils 36 %. Zusätzliche Differenzen durch den Verbrauch während des Liegens oder für Stop-and-Go-Manöver bleiben hierbei unberücksichtigt.

Eine analoge Abschätzung kann für die potenzielle Einsparung mithilfe von RUBIN vorgenommen werden. Unter der Annahme, dass sich aufgrund der Reiseunterstützung die mittlere Fahrgeschwindigkeit aller Schiffe um 1 km/h reduziert (slow steaming), nehmen die Emissionsraten um 8,4 % ab, und der Ausstoß von CO₂ pro Tag und Kilometer sinkt um 180 kg. Diese Werte wurden auf Basis eines über drei Monate lang beobachteten Schiffsverkehrs an dem 166 km langen Rheinabschnitt zwischen Iffezheim und Mainz ermittelt (Abb. 3). Für realistischere Szenarien sind deutlich komplexere Randbedingungen und Wechselwirkungen, wie z. B. die gegenseitige Beeinflussung des Schiffsverkehrs, sowie zusätzliche Einsparungen aufgrund optimierter Transportmengen zu berücksichtigen. Dies geht aber über das Anliegen des vorliegenden Beitrags hinaus.

Da das vorgestellte Modell auf beobachteten Trajektorien basiert, ist es auf Betrachtungen betrieblicher und technischer Änderungen ausgerichtet, die Teile der Flotte bzw. die gesamte Flotte einbeziehen. Für Betrachtungen von Emissionen während Manöverfahrten oder zur Bewertung von individuellen Entscheidungen, die zu abweichenden Trajektorien o. ä. führen, entwickelt die BAW zukünftig fahrdynamische und numerische Motormodelle, die solche Prozesse detaillierter abbilden. In beiden Fällen basieren die Modelle auf Treibstoff- bzw. Emissionsfaktoren, die eine Übertragung der fahrdynamisch- und schiffstypbedingten Leistung auf den Verbrauch und CO₂-Ausstoß erlauben.

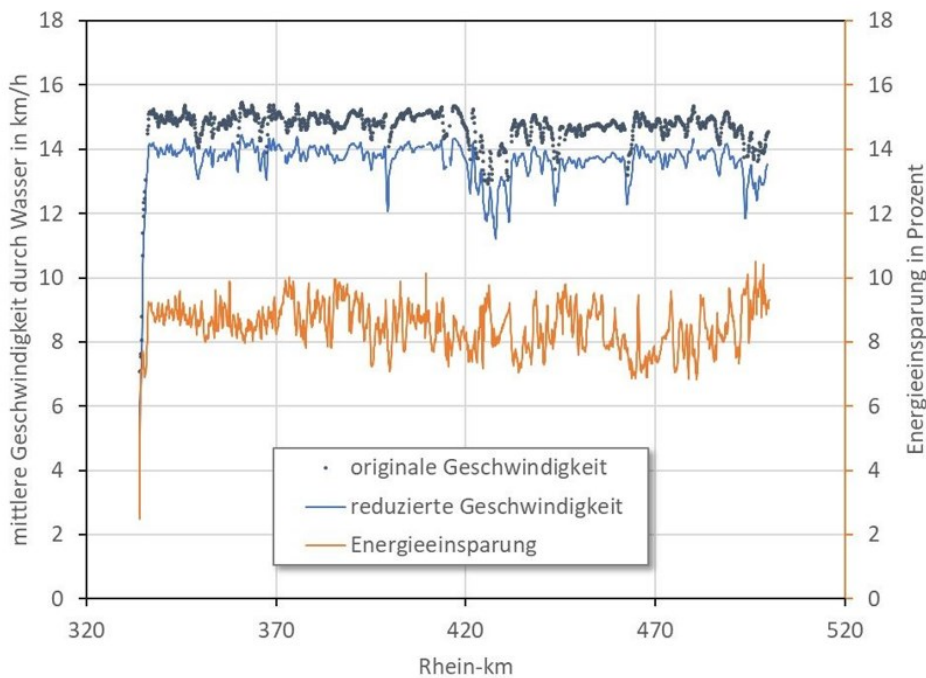


Abb. 3 Modellierter Energieeinsparung durch slow steaming bei einer Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit um 1 km/h an jedem Ort (Mittelung bezieht sich auf die Gesamtheit der beobachteten Schiffe)

3.2 Messungen

Die in Kap. 3.1 genannten Treibstoff- und Emissionsfaktoren werden von Motorenherstellern bereitgestellt und stammen überwiegend aus Prüfstandmessungen. Diese folgen in der Regel standardisierten Zyklen mit unterschiedlichen Drehzahlen und Belastungen des Motors. Jedoch können deutliche Abweichungen zwischen den standardisierten Zyklen und den realen Bedingungen auf einem Schiff bzw. während des Betriebs auf den Wasserstraßen bestehen. Im Straßenverkehr hat sich daher die Messung sogenannter Real-Driving-Emissions (RDE) von Kraftfahrzeugen etabliert, sodass deren tatsächliches Emissionsverhalten mittlerweile gut charakterisiert ist. Für Binnenschiffe gibt es bislang nur wenige Studien, in denen Emissionen von Fähren, Schubbooten oder Güterschiffen im praktischen Fahrbetrieb untersucht wurden (Corbett und Robinson 2001; Pillot et al.; Fu et al. 2013; Zhang et al. 2022). Aus diesem Grund führt die BAW eigene Naturmessungen durch. Bei diesen Messungen handelt es sich um sogenannte On-Board-Messungen, die sowohl den ungestörten Betrieb zur Quantifizierung der RDE, als auch die Emissionen in definierten Lastbereichen erfassen. In beiden Fällen werden die Emissionen direkt im Abgassystem der Schiffe gemessen. Auf Basis der Messungen werden bisherige Annahmen zu den Mittelwerten der Emissionsfaktoren und deren Varianz bestätigt oder widerlegt und angepasst.

Neben der Konzentrationsmessung von CO_2 werden auch gasförmige Luftschadstoffe, wie Kohlenstoffmonoxid CO , Schwefeldioxid SO_2 , Stickoxide NO_x und Kohlenwasserstoffe HC , mithilfe spektraler Gasanalysatoren und eines Flammenionisationsdetektors kontinuierlich aufgezeichnet. Darüber hinaus werden partikuläre Luftschadstoffe mithilfe einer fotoakustischen Methode bzw. mithilfe von Probennahmen über Filter gravimetrisch erfasst. Eine simultane Aufzeichnung der Leistung und des Abgasvolumenstroms über die digitale Datenleitung der Motorsteuerung liefert wichtige Parameter zur Ableitung der grundlegenden Emissionsfaktoren und für die Validierung des Emissionsmodells.

Als ein Beispiel für die Bestimmung der RDE eines 135 m langen und 14 m breiten Binnenschiffs zeigt Abb. 4 die Ergebnisse (ein Tag) einer Messfahrt auf dem Rhein von Mainz nach Rotterdam. Treibstoffverbrauch, Emissionsraten und Emissionsfaktoren sind über lange Zeiträume nahezu konstant. Dies geht einher mit überwiegend konstant gehaltenen Motordrehzahlen. Gegen 10:00 Uhr erfolgt aufgrund des Übergangs von dem freifließenden Rhein auf die strömungsrühige Waal im Rhein-Maas-Delta eine Erhöhung der Drehzahl von 1100 auf 1195 Umdrehungen pro Minute. Mit dieser Drehzahlerhöhung findet sowohl eine Erhöhung des Treibstoffverbrauchs als auch der Emissionsrate statt, während der Emissionsfaktor nahezu unverändert bleibt. Kurzzeitige stärkere Erhöhungen und Verringerungen der Drehzahl stehen häufig in Verbindung mit meist kooperativen Überholungsmanövern, bei denen die Geschwindigkeit des überholten Schiffs gedrosselt wird. Diese sind in der integralen Betrachtung für die Gesamtemission allerdings vernachlässigbar.

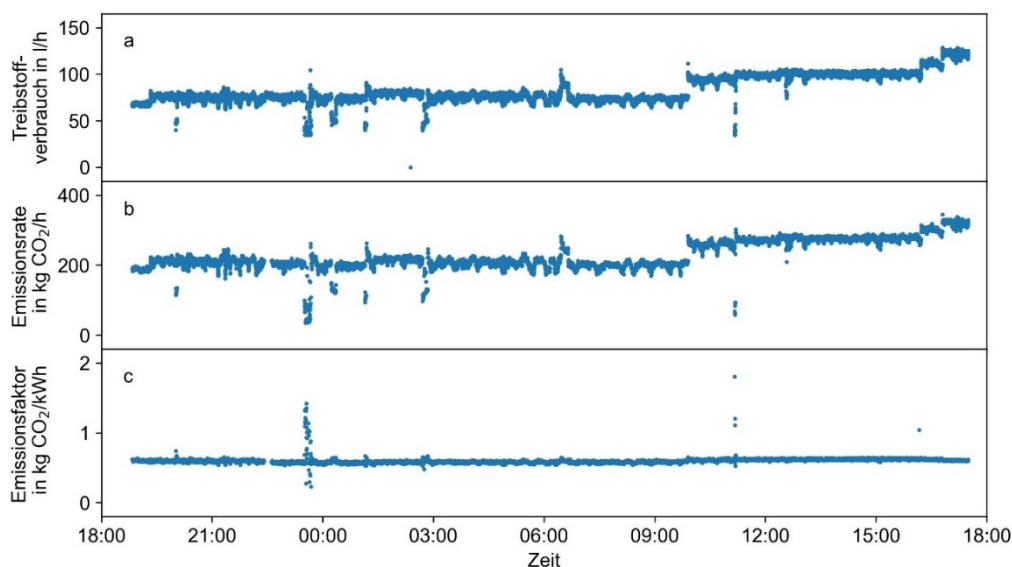


Abb. 4 Ausschnitt eines Tages der Messfahrt auf einem übergroßen Großmotorgüterschiff von Mainz nach Rotterdam mit Angaben zum Treibstoffverbrauch (a), CO₂-Emissionsraten (b) und CO₂-Emissionsfaktoren (c)

Trotz einer nahezu konstanten Fahrweise im realen Betrieb, kann die Abhängigkeit der Emissionsraten und -faktoren von der Drehzahl für die Gesamtemission durch die Integration über die Zeit bzw. über die verrichtete Arbeit bedeutsam sein. Im Fall des leistungsbezogenen Emissionsfaktors für CO₂ lässt sich ein nahezu konstanter Wert mit 0,6 kg/kWh feststellen (Abb. 5a). Im Gegensatz hierzu fällt der Emissionsfaktor für NO_x deutlich bei höheren Drehzahlen bzw. Abgastemperaturen (Abb. 5b). Im Fall von CO steigt der Emissionsfaktor mit größeren Drehzahlen bzw. Abgastemperaturen (ohne Abb.). Diese Veränderungen lassen sich auf die Verbrennungstemperatur und damit einhergehende chemische Verbrennungsprozesse zurückführen. Der Diesel-Verbrauchsfaktor eines Schiffmotors ist analog zum CO₂-Emissionsfaktor relativ konstant und beträgt für die Baujahre 1995-2001 ungefähr 0,205 kg /kWh (Denier van der Gon und Hulskotte, 2012). Im Fall der o. g. Modellierung genügt es demnach, mit konstanten Faktoren über die benötigte Leistung bzw. verrichtete Arbeit auf den Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emission zu schließen. Für die Modellierung der Emissionen von NO_x, CO und weiterer Luftschadstoffe sollten hingegen Faktoren Anwendung finden, die neben dem Leistungsbezug auch die motorspezifische Drehzahl- bzw. lastspezifische Temperaturabhängigkeit berücksichtigen.

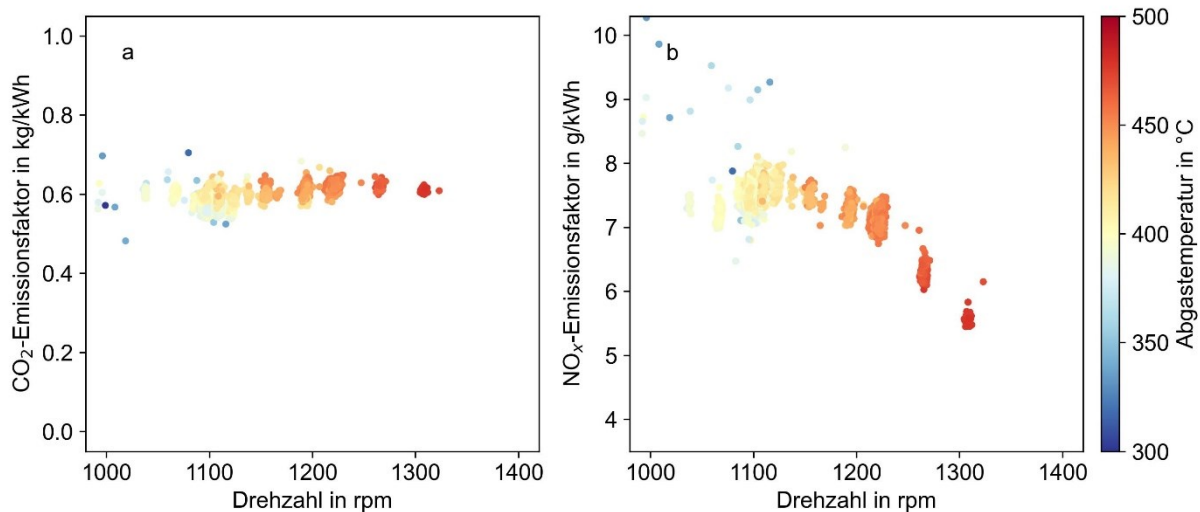


Abb. 5 Leistungsbezogene Emissionsfaktoren für CO₂ (a) und NO_x (b) vs. Drehzahl bzw. Abgastemperatur

Literatur

- BfG (2019). Das Niedrigwasser 2018, Eigenverlag, Koblenz.
- BMVI (2019). Masterplan Binnenschifffahrt, Eigenverlag, Bonn.
- Chen et al. Chen, D., Wang, X., Li, Y., Lang, J., Zhoua, Y., Guoa, X., Zhao, X. (2017). High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014, *Sci. Total Environ.*, 609, 776–787.
- CLINSH (2021). Clinsh Layman's report, Eigenverlag, Den Haag.
- Corbett, J., Fischbeck, P. (2000). Emissions from Waterborne Commerce Vessels in United States Continental and Inland Waterways, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 3254-3260.
- Corbett, J., Robinson, A. (2001). Measurements of NO_x Emissions and In-Service Duty Cycle from a Towboat Operating on the Inland River System, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1343-1349.
- Denier van der Gon, H.A.C.; Hulskotte, J.H.J. (2012). Methodologies for estimating shipping emissions in the Netherlands. A documentation of currently used emission factors and related activity data, Netherlands Environmental Assessment Agency, Eigenverlag Bilthoven, The Netherlands.
- DIW (2022). <https://www.diw.de/sixcms/detail.php?id=285581>, abgerufen am 05.04.2022.
- Fu, M.; Ding, Y.; Ge, Y.; Yu, L.; Yin, H.; Ye, W.; Liang, B. (2013). Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China, *Atmospheric Environment* 81, S. 222–229.
- GDWS (2019). Verkehrsbericht 2019, Eigenverlag, Bonn.
- Heinzelmann, C.; Noss, C. (2022). Grundlagen zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens für das System Schiff/Wasserstraße, 45. Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresden.
- IKSR (2020). Bericht zum Niedrigwasserereignis Juli-November, Eigenverlag, Koblenz.

- IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, 3-24.
- Krueger (2009). Vorlesungsskript Schiffswiderstand, Eigenverlag, Hamburg.
- KSG (2021). Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.
- Noss, C., Wagner, T., Braunroth, N., Schröder, M. (2020). An Intelligent Lockage Management System for Inland Waterways. AISS Conf., Duisburg.
- Pillot, D., Guiot, B., Le Cottier, P., Perret, P., Trassel, P. (2016). Exhaust emissions from in-service inland waterways vessels, J. Earth Sci. Geotechn. Eng., 6(4), 205-225.
- PLANCO (2007). Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße, Eigenverlag.
- Statista (2022). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154528/umfrage/durchschnittliches-alter-der-lkw-in-deutschland/>, abgerufen am 05.04.2022.
- Ting, C., Schonfeld, P. (1999). Effects of Speed Control on Tow Travel Costs. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng, 125(4), 203-206.
- UN (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change -Conference of Parties 21, Eigenverlag, Paris.
- Zhang, Y.; Zhao, K.; Lou, D.; Fang, L. (2022). Study on the real-world emission characteristics of gaseous and particulate pollutants from an inland ship using a portable emission measurement system, Marine pollution bulletin 184, 114205.

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Christian Noss
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe
christian.noss@baw.de

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Christoph Heinzelmann
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe
christoph.heinzelmann@baw.de

