

## Verlässliche Kraftstoffverbrauchsmessungen im maritimen Sektor

Corinna Kroner, Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Manfred E. Werner, IB-HAWE

Das Bestreben, das maritime Transportwesen zu dekarbonisieren, verbunden mit sukzessiv verschärften Anforderungen, stellt die Branche vor neue Herausforderungen. So wurde auf der im Juli 2021 stattgefundenen Sitzung des Ausschusses zum Schutz der Meeresumwelt (MEPC) der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO) beschlossen, Anfang 2023 zwei neue Maßnahmen einzuführen, welche den Energieeffizienzindex für vorhandene Schiffe (EEXI) und den Kohlenstoffintensitätsindikator (CII) betreffen.

Während sich der bereits seit 2013 für Neubauten vorgeschriebene EEXI darauf bezieht, wie Schiffe konzipiert oder ausgestattet sind, ist der CII ein Indikator dafür, wie die Schiffe betrieben werden. Während der einmalig ermittelte EEXI angibt, wieviel Gramm CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit von Entfernung und Ladevolumen unter alleiniger Berücksichtigung der Konstruktionsparameter des Schiffes ausgestoßen werden, schreibt der CII die Erfassung der tatsächlich ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-Emissionen für in Verkehr befindliche Schiffe mit einer Bruttoreaumzahl von 5.000 BRZ und mehr vor. Der CII fällt in den Verantwortungsbereich der Schiffsbetreiber. In einer fünfstufigen Skala von „A“ bis „E“ wird ermittelt, wie sauber das Schiff in den vergangenen 12 Monaten betrieben wurde. Werden Schiffe in drei aufeinander folgenden Jahren mit „D“ oder in einem Jahr mit „E“ bewertet, muss ein Maßnahmenkatalog zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung erarbeitet werden, um mindestens die Bewertung „C“ zu erreichen.

Des Weiteren greift ab dem Jahr 2024 der CO<sub>2</sub>-Emissionshandel: Ende November 2022 haben sich die EU-Gesetzgeber darauf geeinigt, den Seeverkehr in das Emissionshandelssystem (ETS) einzubeziehen. Schiffsbetreiber werden damit verpflichtet, für die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Schiffe zu zahlen. Weitere Einzelheiten zu den Anforderungen und Verfahren sind zu erwarten, sobald der endgültige Text hierzu angenommen ist und die Europäische Kommission die entsprechenden Durchführungs- und delegierten Rechtsakte erlässt. Das EU-Emissionshandelssystem ist ein System, bei dem eine begrenzte Menge von Emissionszertifikaten (= Obergrenze) auf den Markt gebracht wird und gehandelt werden kann. Die Obergrenze wird jedes Jahr gesenkt, um sicherzustellen, dass das Emissionsziel der EU für 2030, einer Senkung der Emissionen um 55 % im Vergleich zu 1990, erreicht werden kann und die EU bis 2050 klimaneutral wird. Der EU-Emissionshandel für die Industrie besteht bereits seit dem Jahr 2005, nun ist weltweit erstmalig auch die Schifffahrt in einen solchen Emissionshandel einbezogen. Das Vorhaben ist Teil des „Fit-for-55“-Pakets im Rahmen des European Green Deal.

Von 2024 an wird das ETS für Schiffe über 5000 BRZ gelten, die Fracht oder Fahrgäste zu gewerblichen Zwecken befördern. Die Emissionen werden über das bereits bestehende MRV-System (Monitoring, Reporting and Verification) der EU gemeldet und verifiziert. Das MRV-System der EU wird ab 2025 auf Offshore-Schiffe über 400 BRZ und Stückgutfrachter zwischen 400 und 5000 BRZ, die Fracht zu kommerziellen Zwecken befördern, ausgeweitet. Offshore-Schiffe über 5000 BRZ werden ab dem Jahr 2027 in das ETS einbezogen. Bis 2026 wird die Europäische Kommission prüfen, ob auch Stückgut- und Offshore-Schiffe zwischen 400 und 5000 BRZ in das Emissionshandelssystem einbezogen werden sollen. Darüber hinaus wird ab 2024 die Berichterstattung auf die Treibhausgase Methan und Distickstoffoxid (Lachgas) erweitert. Ab 2026 wird das ETS dann auch diese beiden Treibhausgase einschließen.

Künftig müssen 100 % der zurückgelegten Schiffsreisen innerhalb der EU-Gewässer und 50 % der Reisedistanzen zwischen EU- und Nicht-EU-Häfen durch Emissionsberechtigungen (EUA) abgedeckt werden. Für die Umsetzung in Deutschland ist die Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt zuständig. Vorgesehen ist eine stufenweise Einführung des Handels. 2024 werden zunächst 40 % des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes berücksichtigt, 2025 sollen es 70 %

und ab 2026 dann 100 % sein. Als Bemessungsgröße für die Emissionen werden die Bunker- verbräuche herangezogen, die, multipliziert mit dem CO<sub>2</sub>-Faktor des Kraftstoffes, die zu kompensierende Menge CO<sub>2</sub> ergeben.

Der Wert des CII wird wesentlich durch die Art des verwendeten Kraftstoffs, die Effizienz des Schiffes, Betriebsparameter wie Schiffsgeschwindigkeit, beförderte Ladung, Wetterbedingungen und durch den allgemeinen Zustand des Schiffes beeinflusst. Die einfachste Lösung, Kraftstoff einzusparen und die Emissionsklasse zu halten, besteht darin, die Schiffsgeschwindigkeit zu reduzieren. Allerdings funktioniert diese Lösung nur kurzfristig und bringt andere Nachteile mit sich.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich für die Schifffahrt Anreize, mittels schiffs- und antriebs- spezifischer Maßnahmen die Gesamteffizienz im operativen Betrieb, insbesondere auch durch Nutzung von Digitalisierungspotenzialen, zu optimieren und erneuerbare Energieträger in Gemischen oder, abhängig von den Gegebenheiten, rein zu verwenden.

Im Sinne von CII und ETS, aber auch aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus, ist es opportun, Maßnahmen und deren Umsetzung datengetrieben zu planen und ihre Wirksamkeit verlässlich zu quantifizieren. Dies bedeutet eine Begleitung des Ganzen mit geeigneter, hinreichend genauer Messtechnik. Diesbezüglich finden sich derzeit eher wenig Vorgaben oder Empfehlungen. Im „*Guidance/Best practices document on monitoring and reporting of fuel consumption, CO<sub>2</sub> emissions and other relevant parameters pursuant to Regulation 2015/757 on monitoring, reporting and verification emissions from maritime transport*“ [1] sind Hinweise zur Bestimmung von Gesamtmessunsicherheiten sowie Richtwerte hinsichtlich der im Monitoringkonzept gewählten Methoden zur CO<sub>2</sub>-Bestimmung gegeben. Als Maximalwert für die Gesamtmessunsicherheit der Kraftstoffermessung wird ein Wert von 10 % angesetzt, unabhängig von der Art der Bestimmung. Darüber hinaus gibt es keine weitergehenden Anforderungen oder Empfehlungen zur Art und Weise der Messwertermittlung und gesicherten Dokumentation dieser.

Die mit dem Kraftstoffverbrauchswert einhergehende Messunsicherheit wirkt sich wie alle weiteren Messgrößen auch auf den ermittelten CII aus, vereinfacht gesprochen, mit welcher Sicherheit ein Schiff liegt in einer der Klassen. Allein aufgrund der Messunsicherheit der Kraftstoffverbrauchsmessung ergibt sich bereits eine Unsicherheit in vergleichbarer Größenordnung für den CII. Für einen belastbaren CII-Wert ist der Standardwert für die Messunsicherheit der Kraftstoffverbrauchsmessung in der Regel zu hoch. So liegt beispielsweise die Klassenbreite für die C-Bewertung im einstelligen Prozentbereich.

Entsprechendes gilt vorgeschaltet für einen belastbaren Nachweis einer Verbrauchsreduktion, wie sie für die Einhaltung oder Verbesserung der Emissionsklasse erforderlich ist. Anzustreben ist eine Kraftstoffverbrauchsermittlung, die mindestens eine Größenordnung besser ist.

Zur Identifikation von Kraftstoffeinsparpotenzialen wie auch als Eingangsparemeter für ein Leistungsüberwachungssystem kann sich eine kontinuierliche Kraftstoffverbrauchsmessung als hilfreich erweisen.

Erfolgt die Kraftstoffverbrauchsermittlung aus Durchflussmessungen in der Vor- und Rücklaufleitung eines Verbrauchers, so wirkt sich die Genauigkeit bei beiden Messungen aus:

Ein einfaches fiktives Zahlenbeispiel zur Illustration:

Haben beide Durchflussmessgeräte eine Messunsicherheit von 1 %, so wird ein gemessener Durchfluss von 4000 l/h im Vorlauf mit einer Unsicherheit von 40 l/h, ein gemessener Durchfluss von 2500 l/h im Rücklauf von 25 l/h behaftet sein. Hieraus resultiert ein Kraftstoffverbrauch von 1500 l/h mit einer Unsicherheit von 65 l/h, was 4 % entspricht. Wird im Rücklauf dagegen ein Durchfluss von 3600 l/h gemessen, so ergibt sich eine Unsicherheit in der Verbrauchsbestimmung von 76 l/h. In diesem Fall ergibt sich ein Fehler von 19 % in der Kraftstoffverbrauchsbestimmung.

Messgeräte, die für die angesprochenen Überwachungszwecke eingesetzt werden, müssen kalibriert sein. Dies sollte in einem akkreditierten Kalibrierlabor erfolgen, so dass die Rückführung auf ein staatliches Metrologieinstitut gewährleistet ist. Bei Durchflussmessgeräten erfolgt die Kalibrierung vielfach mit einer Flüssigkeit ungleich dem im Betrieb genutzten Medium und unter Laborbedingungen, weshalb eine Anpassung der Kalibrierung auf den verwendeten Kraftstoff und unter Betriebsbedingungen erforderlich werden kann.

Eine deutlich geringere Messunsicherheit in der Kraftstoffverbrauchsbestimmung als der eingangs genannte Standardwert von 10 % ist mit Durchflussmessgeräten zu erreichen, wenn alle maßgeblichen Einflussfaktoren in ihrer Größenordnung quantifiziert werden können.

Ein modernes, effizientes Energiemanagement eines Schiffes bedarf der Bereitstellung von Energieverbrauchsdaten für die realen Gegebenheiten. Diese können beispielsweise über ein Decision Support System, in dem technische, Umwelt- und ökonomische Daten zusammengeführt werden, gekoppelt mit Geo-Informationen, generiert werden. Anhand von online-Simulationen kann die Schiffsführung in ihren Entscheidungen unterstützt werden. Datengetriebene kurz-, mittel- und langfristige Prognosen und Entscheidungen im Zusammenhang mit dem Schiffsbetrieb lassen sich vornehmen. Hier laufen seit einer Reihe von Jahren verschiedenste Aktivitäten. Wie überall, gilt allerdings auch hier, dass Modelle und hieraus resultierende Prognosen nicht besser sein können als die Daten, auf denen sie basieren oder zu ihrer Überprüfung genutzt wurden. Dies heißt, auch hier werden verlässliche Kraftstoffverbrauchsdaten benötigt, die in ihrer Genauigkeit über den Standardwert hinausgehen.

Mit Blick auf die Verwendung von Bio- oder synthetischen Kraftstoffen, sei es in Reinform oder als Blend mit einem fossilen Kraftstoff, ist u. a. für einen optimierten Motorbetrieb von Bedeutung, wie sich deren Druck- und Temperaturabhängigkeit der Dichte und Viskosität ändert. Bei Blends ergibt sich im einfachsten Fall die Dichte aus einer Addition entsprechend der Volumenanteile und eine lineare Temperaturabhängigkeit. Treten Wechselwirkungen zwischen Gemischkomponenten auf, ist ein solch einfacher Zusammenhang nicht mehr unbedingt gegeben. Eine veränderte Mediumsdichte wirkt sich in der Kraftstoffverbrauchsermittlung aus. Ändert sich die Temperatur bei einem Leichtöl beispielsweise von 15 °C auf 30 °C, so verringert sich die Dichte von 900 kg/m<sup>3</sup> auf 890 kg/m<sup>3</sup>. Der Durchfluss würde sich in diesem Fall von 2500 l/h auf 2528 l/h erhöhen und der Kraftstoffverbrauch auf 1472 l/h reduzieren, was in einer Fehlbestimmung von rund 2 % münden würde. Deswegen ist zu ermitteln, inwieweit derzeitige Temperaturumrechnungen für neuartige Kraftstoffe Gültigkeit haben.

Klärung dieser Fragen soll das Forschungsprojekt Safest<sup>1</sup> (Sustainable advanced flow meter calibration for the transport sector – 20IND13) des European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) der European Association of National Metrology Institutes (EURAMET<sup>2</sup>) liefern. Schwerpunkte liegen auf der Charakterisierung verschiedenster Kraftstoffe bzgl. Dichte und Viskosität, einer verbesserten insitu-Messung dieser Größen als auch der Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die Kraftstoffverbrauchsmessung mittels Durchflussmessgeräten. Das Safest-Konsortium aus fünf europäischen nationalen Metrologieinstituten, drei Universitäten und einem Ingenieurbüro wird mit seinen Arbeiten eine verlässliche Kraftstoffverbrauchsermittlung und den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen vorantreiben. Projektergebnisse werden u.a. in einem Leitfaden zur Messunsicherheit von Kraftstoffverbrauchsbestimmung anhand von Durchflussmessungen sowie Dichte- und Viskositätsdaten zu verschiedensten Bio- und synthetischen Kraftstoffen münden.

Eine Steigerung der Schiffseffizienz im Sinne der Gesetzgebung, aber auch insbesondere im Sinne von Reeder oder Betreiber, geht Hand in Hand mit einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, der einen wesentlichen Teil der operativen Betriebskosten ausmacht, unter Einsatz

---

<sup>1</sup> <https://www.ptb.de/empir2021/safest/the-project/>

<sup>2</sup> <https://www.euramet.org/>

digitaler Technologien. Zur Klärung von Fragen, wie ein geeignetes Leistungsüberwachungssystem aufgesetzt sein sollte und Lösungen im Schiffsbetrieb ausgeführt sein können, werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes einen wertvollen Beitrag leisten.

#### Die Projektpartner im Safest-Konsortium

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Deutschland)
- Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Italien)
- RISE Research Institutes of Sweden AB (Schweden)
- Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (Türkei)
- Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy (Finnland)
- IB-HAWE, Ing.-Büro Hagemann (Deutschland)
- Imperial College of Science, Technology and Medicine (Großbritannien)
- Technische Universität Chemnitz (Deutschland)
- Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale (Italien)
- Università degli Studi di Perugia (Italien)

Projekt-Webseite: <https://www.ptb.de/empir2021/safest/the-project/>

#### Danksagung

Dieses Projekt (EMPIR JRP 20IND13 SAFEST) wird aus dem EMPIR-Programm, das von den teilnehmenden Staaten kofinanziert wird, und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union finanziert.

#### Referenz

[1] [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-07/02\\_guidance\\_monitoring\\_reporting\\_parameters\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-07/02_guidance_monitoring_reporting_parameters_en.pdf), Zugriff 25.01.2023