

BEURTEILUNG DES ENERGIEBEDARFS VON BINNENSCHIFFEN MIT HILFE VON ENERGIE- EFFIZIENZ INDIZES

Juni 2020

CESNI Arbeitsprogramm 2019-2021, Aufgabe PT-26

Haftungsausschluss

Die in dieser Studie dargestellten Fakten und geäußerten Meinungen sind die der Autoren und spiegeln nicht notwendigerweise auch die Auffassung des BMVI oder des CESNI zu diesem Thema wider. Die Nutzung der in diesem Dokument enthaltenen Kenntnisse, Informationen und Daten erfolgt auf eigenes Risiko. Das BMVI und der CESNI übernehmen für die Nutzung der in diesem Dokument enthaltenen Kenntnisse, Informationen und Daten oder die sich daraus ergebenden Folgen keinerlei Haftung.



FE-Projekt 40.0399/2017 Beurteilung des Energiebedarfs von Binnenschiffen mit Hilfe von Energie-Effizienz Indizes

Kurzfassung zum Endbericht Nr. 2252

April 2019

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V.
DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

Oststraße 77
47057 Duisburg

Tel. +49 203 99369-0
Fax +49 203 99369-70
e-mail dst@dst-org.de
web www.dst-org.de



Mitglied der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
"Otto von Guericke" e. V.



Mitglied der Johannes-Rau-Forschungsgemeinschaft e. V.



Institut an der Universität Duisburg-Essen



Mitglied der International Towing Tank Conference



Mitglied des Center of Maritime Technologies e. V.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Einleitung	12
1.1 Hintergrund und Motivation	12
1.2 Zielsetzung und Bedingungen	14
1.3 Allgemeines Konzept	14
2 Berechnungsansatz und Vorgehensweise	15
3 Hinweise zum Bearbeitungskonzept	18
4 Vorschlag für einen allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$	19
4.1 Fahrzeugklassen und Randbedingungen	19
4.1.1 Fahrzeugklasse 1 - 3	19
4.1.2 Fahrzeugklasse 4	20
5 Vorschlag für einen fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$	22
5.1 Wasserstraßen der Zone 3 (Rhein)	22
5.1.1 Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)	22
5.1.2 Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)	23
5.1.3 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)	25
5.1.4 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)	27
5.2 Wasserstraßen der Zone 4	28
5.2.1 Fahrzeugklasse 1 und 2 (Trockengutschiffe, Containerschiffe und Tankschiffe)	29
5.2.2 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)	29
5.2.3 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)	30
6 $EEDI$ s für stufenweise Bewertung	31
6.1 Stufenweise Bewertung zum allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$	31
6.1.1 Fahrzeugklasse 1 - 3	31
6.1.2 Fahrzeugklasse 4	32
6.2 Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$, Zone 3 (Rhein)	32
6.2.1 Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)	32
6.2.2 Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)	34
6.2.3 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)	34
6.2.4 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)	34

6.3	Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$, Zone 4	34
6.3.1	Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)	35
6.3.2	Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)	35
6.3.3	Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)	35
6.3.4	Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)	35
7	<i>EEOI</i> in der Binnenschifffahrt	36
7.1	Einfluss der Umgebungsbedingungen	36
7.2	Vorschlag für die Erfassung des <i>EEOI</i>	36

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	$EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinie für Binnenschiffe.....	21
Abb. 2:	$EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 1.....	23
Abb. 3:	$EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 2.....	24
Abb. 4:	$EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 3.....	26
Abb. 5:	$EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 4.....	28
Abb. 6:	Kanal mit einem trapezförmigen Querschnitt.....	28
Abb. 7:	Stufenweise Bewertung des allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$	31
Abb. 8:	Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$	33
Abb. 9:	Beispielhaftes Auswertungsblatt für die Ermittlung eines $EEOI$ in der Binnenschifffahrt.....	38

Abkürzungsverzeichnis

B	[m]	Schiffsbreite
CF^1	[-]	Umrechnungsfaktor auf CO ₂
dw	[t]	Tragfähigkeit
D	[nm], [km]	Entfernung
$EEDI$	$\left[\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{t km}}\right]$	Energie-Effizienz Design-Index
$EEOI$	$\left[\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{t km}}\right]$	Energie-Effizienz Betriebs-Indikator
Fr_h	[-]	Tiefen-Froude-Zahl
h	[m]	Wassertiefe
j	[-]	Transportnummer
L	[m]	Schiffslänge
SFC^2	$\left[\frac{\text{g}_{\text{Diesel}}}{\text{kWh}}\right]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch, 215 g/kWh
T	[m]	Tiefgang
P_D (Schiffstyp) (Berg oder Tal oder Mittel)	[kW]	Wellenleistung Index: Schiffstyp (MS, TMS, SV, FGS), Index: Berg oder Tal (Wellenleistung zu Berg oder zu Tal) oder Mittel (mit der Zeit gewichtete mittlere Wellenleistung)
P_{ME}^3	[kW]	75 % der gesamten installierten Wellenleistung
V_{ref}	[kn]	Geschwindigkeit
V_{str}	$\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	Strömungsgeschwindigkeit
$V_{üG}$	$\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right], \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Geschwindigkeit über Grund
$V_{üG \text{ Berg}}$	$\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	Geschwindigkeit über Grund zu Berg
$V_{üG \text{ Tal}}$	$\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$	Geschwindigkeit über Grund zu Tal
Δ	[t]	Verdrängung [m ³] · Dichte _{Wasser} [t/m ³]

¹ MEPC 245(66) „2014 Guidelines on the calculation of the Attained EEDI for new ships“, ISO 8217.

² MEPC 215(63) “2012 Guidelines for calculation of Reference Lines for use with the Energy Efficiency Design Index EEDI”, für Binnenschiffe wurde ein spezifischer Kraftstoffverbrauch von 220 g/kWh ermittelt.

³ MEPC 215(63) “2012 Guidelines for calculation of Reference Lines for use with the Energy Efficiency Design Index EEDI”.

Zusammenfassung

In dieser Ausarbeitung wurden die Möglichkeiten zur Beurteilung der Energie-Effizienz von Binnenschiffen mit Hilfe von Energie-Effizienz Indizes untersucht. Ein Bewertungssystem für die Energie-Effizienz von Binnenschiffen erscheint sinnvoll, weil so die Schiffseigner bei ihren Investitionsentscheidungen unterstützt werden können und ökonomische Anreizsysteme eine transparente Basis erhalten. Außerdem kann für staatliche Subventionssysteme eine solide maßnahmenunabhängige Bezugsbasis geschaffen werden.

Die Basis dieser Studie war der aus der Seeschifffahrt bekannte Energie-Effizienz Design-Index (*EEDI*). Nach kurzer Darstellung der Vorgehensweise bei der Beurteilung der Energie-Effizienz von Seeschiffen wurden die davon abweichenden Rahmenbedingungen der Binnenschifffahrt ausgearbeitet. Hier ist insbesondere die Tatsache zu nennen, dass Binnenschiffe deutlich geringere Motorleistungen einsetzen als die maximal verfügbare installierte Leistung, die lediglich für seltene extreme Fahrtsituationen mit großem Leistungsbedarf benötigt werden. Auf dem Rhein beispielsweise wird ein beladenes Motorgüterschiff mit einer Länge von 110 m, einer Breite von 11,45 m und einem Tiefgang von 2,8 m bei mittleren bis hohen Wasserständen in der Bergfahrt etwa 600 kW bis 1000 kW und in der Talfahrt etwa 100 kW bis 300 kW einsetzen. Die installierte Antriebsleistung kann aber 2500 kW oder mehr sein. Ein Betriebspunkt mit einer Antriebsleistung von 75 % der gesamten installierten Antriebsleistung, wie dieser in der Seeschifffahrt gewählt wird, stellt damit keinen repräsentativen Betriebspunkt eines Binnenschiffes dar.

Weitere wesentliche Einflussfaktoren auf die Energie-Effizienz von Binnenschiffen sind das Einsatzgebiet und die Gewässerbedingungen. Denn davon ist maßgeblich der vom Betreiber gewünschte minimale Tiefgang, bei dem das Fahrzeug noch eingesetzt werden soll, abhängig. Dieser minimale Tiefgang bestimmt wiederum den oder die Propellerdurchmesser bzw. das Propulsionskonzept. Der Propellerdurchmesser spielt für einen energieeffizienten Betrieb des Fahrzeuges bei allen Tiefgängen eine wichtige Rolle. Schiffe, die für kleine Tiefgänge entworfen werden, würden bei der Wahl eines großen Bezugstiefgangs, wie z. B. des im Schiffsattest dokumentierten maximalen Tiefgangs, merklich benachteiligt. Außerdem sind noch die signifikanten Unterschiede bei den Schiffstypen hinsichtlich des Eigengewichts und damit der Tragfähigkeit sowie die sehr unterschiedlichen Formationen von Schubverbänden zu nennen. Die Verwendung der Tragfähigkeit bei der Bestimmung der Transportleistung als Bestandteil des *EEDIs* ist daher nicht für alle Schiffstypen geeignet.

Unter Berücksichtigung dieser und weiterer Rahmenbedingungen wurde auf Basis der Formulierung des *EEDIs* für Seeschiffe ein möglicher Ansatz für die Binnenschiffe entwickelt. Dabei wurde die Leistung (75 % der installierten Leistung) durch eine schiffstypabhängig einzusetzende Wellenleistung und die Referenzgeschwindigkeit V_{ref} durch die Geschwindigkeit über Grund $V_{\text{üG}}$ ersetzt. Bis auf die Fahrzeugklasse 4, Fahrgastschiffe, wird die Tragfähigkeit verwendet. Bei Fahrgastschiffen wird die Verdrängungsmasse Δ eingesetzt, um die Anzahl der Fahrgastschiffs-

typen (Tagesfahrgastschiff, Kabinenschiff oder Fahrgastschiffsgrößen abhängig von der Anzahl der Fahrgäste) gering zu halten. Statt 215 g/kWh für Seeschiffe sollte für Binnenschiffe ein spezifischer Verbrauch von 220 g/kWh eingesetzt werden. Diese Angabe entstammt den Prüfstandprotokollen von Binnenschiffsmotoren.

Mit Hilfe dieses Ansatzes wurden *EEDI*-Werte der Fahrzeugvarianten berechnet und in Form von Punktdiagrammen dargestellt. Die dafür benötigten Eingangsdaten (Leistung, Geschwindigkeit und Tragfähigkeiten) stammten aus Leistungsprognosen, die in der Vergangenheit am DST auf Basis von Modellversuchsergebnissen für unterschiedliche Schiffstypen, Wassertiefen und Geschwindigkeiten etc. ermittelt wurden. Insgesamt wurden 500 Fahrprofile von Modellversuchen des DST gesichtet und ausgewertet. Es wurde angenommen, dass diese Daten ein repräsentatives Abbild des hydrodynamisch bedingten Energiebedarfs zur Erreichung einer Zielgeschwindigkeit darstellen.

Der Verbrauch zusätzlicher Energieerzeuger für

- den nautischen und technischen Schiffsbetriebs in Fahrt und in Ruhe
- das Ladungsgut
- die Notstromversorgung
- die Bugsteueranlage
- das Ballastsystem
- die Personalräume und Personaleinrichtungen

konnte nicht berücksichtigt werden, da diese Daten nicht zur Verfügung standen. Für die Bestimmung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ von Binnenschiffen wurde vorgeschlagen, nur die Wellenleistung des Vortriebes zu berücksichtigen. Damit könnten auch die relativ hohen Investitionskosten entfallen, um alle Haupt- und Nebenaggregate mit Verbrauchsmesseinrichtungen auszurüsten.

Im nächsten Schritt wurde angestrebt, die Streubreiten bei den Energie-Effizienz Indizes für unterschiedliche Bedingungen (Wassertiefe, Tiefgang etc.) und Schiffstypen bzw. Formationen durch gezielte Regressionsanalysen zu minimieren und so den Geltungsbereich der *EEDIs* zu vergrößern. Es wurden drei Bewertungsansätze quantitativ untersucht, eine Bewertung nach der Tiefen-Froude-Zahl, nach der Geschwindigkeit über Grund und mittels einer parametrisierten Wellenleistung. Die Wellenleistung konnte durch eine Funktion, abhängig von der Wassertiefe, der Tragfähigkeit bzw. der Verdrängungsmasse und der Schiffsbreite, beschrieben werden. Dieser Ansatz wurde im Grundsatz bevorzugt.

Für die mit dem bevorzugten Bewertungsansatz je Schiffstyp erstellten Daten wurden obere Begrenzungen als Einhüllende ermittelt, die folglich von den Hauptparametern der Fahrzeuge (Tiefgang, Verdrängungsmasse oder Tragfähigkeit, Schiffsbreite, Schiffslänge und Wellenleistungen) und von den Wasserstraßenverhältnissen (Wassertiefe, Fahrwasserbreite und Strömung) abhängig sind.

Ein Abgleich der Ergebnisse aus den Modellversuchen mit Großausführungsmessungen führte teilweise zu Anpassungen, d. h. Verschiebungen bzw. Verlaufsänderungen der einhüllenden Kurven. Insgesamt sind 65 Fahrprofile von naturgroßen Messungen des DST ausgewertet worden.

Die einhüllenden Kurven sind die Trendlinien eines $EEDI_{\text{Binnen}}$. Alle berechneten $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Werte der erfassten Fahrzeuge aus den Modell- und Naturuntersuchungen liegen unterhalb dieser Trendlinien.

Daraus wird die Hypothese abgeleitet, wenn die bei der Regressionsanalyse berücksichtigten Fahrzeuge repräsentativ für die bestehende Flotte sind, dann werden die tatsächlichen $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Werte der Fahrzeuge der bestehenden Flotte die ermittelten $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien nicht überschreiten.

Im Ergebnis waren 4 Fahrzeugklassen nötig, um die Binnenschiffsflotte geeignet zu repräsentieren:

- Fahrzeugklasse 1: Trockengut- und Containerschiffe
- Fahrzeugklasse 2: Tankschiffe
- Fahrzeugklasse 3: Schubverbände
- Fahrzeugklasse 4: Fahrgastschiffe

Für die Fahrzeugklassen 1-3 ist die einzusetzende Wellenleistung abhängig von der Tragfähigkeit dw , für die Klasse 4 von der Verdrängungsmasse Δ . Bei allen Fahrzeugklassen ist die Wellenleistung zusätzlich abhängig von der Wassertiefe und der Schiffsbreite. Die Gültigkeitsbereiche der ermittelten Zusammenhänge, z. B. bezogen auf die Wassertiefe h , den Schiffstiefgang T , die Strömung V_{str} , die Schiffsbreite B und das h/T -Verhältnis, wurden stets angegeben.

Die Regressionsanalysen mündeten anschließend in zwei Vorschläge für die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Energie-Effizienz von Binnenschiffen. Der erste vereinfachte Vorschlag gilt für alle Fahrzeuge. Die Probefahrt zur Ermittlung des erreichten $EEDIs$ kann auf tiefem Fahrwasser erfolgen, sofern solche Wassertiefen zur Verfügung stehen. Diese Betrachtung kann äquivalent zum $EEDI$ für die Seeschiffe eingestuft werden. Beim zweiten Vorschlag wird zwischen unterschiedlichen Fahrtgebieten, der Zone 3 (Rhein) und der Zone 4 inkl. der Kanalstrecken, unterschieden. Unter der Voraussetzung, dass der Verbrauch für den Vortrieb mittels Verbrauchsanzeiger erfasst oder die Wellenleistung gemessen wird, kann der $EEDI_{\text{Binnen}}$ der Binnenschiffe folglich auf tiefem und seitlich nahezu unbeschränktem Wasser sowie in Fahrt auf Flüssen mit Strömung und Fahrwasserbreiten entsprechend denen des Rheins mit den erarbeiteten Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Ebenso kann der $EEDI_{\text{Binnen}}$ bei Fahrt in einem Standardkanal bestimmt werden. In allen Fällen sollten repräsentative Testgebiete ausgewiesen werden.

Die praktische Vorgehensweise bei der Probefahrt zur Bestimmung der Energie-Effizienz wurde kritisch beurteilt. Für Neubauten könnte eine $EEDI$ -Fahrt zwar ohne hohe zusätzliche Investitionskosten verbunden sein, weil die Motoren in der Regel über eine Verbrauchsanzeige verfügen. Die Genauigkeit dieser Anzeigen wäre zu prüfen. Die Schiffe der Bestandsflotte müssen jedoch mit einer Messeinrichtung zur Bestimmung der Wellenleistung ausgerüstet werden.

Das Ziel des vorliegenden Konzeptes ist die Entwicklung eines repräsentativen Energie-Effizienz Index ($EEDI_{\text{Binnen}}$) für Binnenschiffe unter Berücksichtigung ihres Einsatzgebietes. Da der $EEDI_{\text{Binnen}}$ nur einen Schiffsbetriebspunkt berücksichtigt, gemessen an der Vielzahl von möglichen Betriebspunkten, sind auch andere Vor-

gehensweisen und Konzepte denkbar, um einen Energie-Effizienz Index vorzuschlagen. Der vorgestellte Vorschlag soll die Diskussion in der Schifffahrtsbranche zu dieser Thematik anstoßen.

Neben den konkreten Vorschlägen zum $EEDI_{\text{Binnen}}$ wurde auch ein Ansatz für den Umgang mit dem Energie-Effizienz Betriebs-Indikator ($EEOI$) ausgearbeitet.

Im Vergleich zum $EEDI_{\text{Binnen}}$ repräsentiert der $EEOI$ nicht nur einen Betriebspunkt. Der $EEOI$ berücksichtigt den gesamten Verbrauch, bzw. den CO_2 -Ausstoß relativ zu der Transportmenge und dem Transportweg. Als wesentliche Herausforderung wurde angesehen, dass die Erfassung der Energieverbräuche auf gleichen Strecken an unterschiedlichen Tagen aufgrund unterschiedlicher Gewässerbedingungen, wie z. B. Pegelständen und Strömungsgeschwindigkeiten, zu unterschiedlichen Ergebnissen mit eingeschränkter Vergleichbarkeit führen.

Für die Bestimmung eines $EEOI$ ist ein Vorschlag erarbeitet worden, der es ermöglicht, eine energetische Bewertung der einzelnen Binnenschiffe in ihrer jeweiligen Fahrzeugklasse und in ihrem Einsatzgebiet bzw. auf Teilstrecken durchzuführen. Bei dem Konzept wird die Fahrtstrecke unterteilt, sobald sich die Parameter der Wasserstraße erheblich verändern. Weiterhin wird nicht nur der Verbrauch für den Vortrieb, sondern der gesamte Verbrauch des Schiffes einer Teilstrecke oder der Gesamtstrecke berücksichtigt. Der Verbrauch wird an den Füllstandsanzeigen der Kraftstofftanks abgelesen und dokumentiert.

Jedoch sollten die Teilstrecken ausreichend lang sein, um den Verbrauch an den Füllstandsanzeigen genau ablesen zu können. Je nach Größe und Geometrie der Tanks sowie der Genauigkeit der Ablesung der Füllstandsanzeigen sollte eine angemessene Kraftstoffmenge verbraucht sein. Für die Ermittlung eines Betriebspunktes beispielsweise für einen Zeitraum von etwa 1 bis 2 Stunden (Zeitbedarf für eine $EEDI$ -Fahrt) sind die Füllstandsdifferenzen zu gering, um den genauen Verbrauch festzustellen.

Die Methode des Vorschlages zur Ermittlung des $EEOI$ kann von den Schiffsbetreibern selbst durchgeführt werden. Dazu sollten repräsentative Strecken innerhalb des Wasserstraßennetzes genutzt werden, auf denen ein $EEOI$ festgestellt werden kann.

Für Neubauten könnte ein $EEDI_{\text{Binnen}}$ entweder im tiefen Wasser oder auf einer repräsentativen Strecke mit Hilfe von kalibrierten Verbrauchsanzeigen erfolgen.

Für die Bestandsflotte als auch für Neubauten sollte der $EEOI$ für die befahrenen Teilstrecken und die Gesamtstrecke des Transportes fortlaufend ermittelt werden.

Zur Reduzierung der CO_2 -Emission der Binnenschiffe wurde für Schiffsneubauten eine Abstufung von 15 % und von 25 % bezogen auf die ermittelten Relationen vorgeschlagen. Diese Reduzierung könnte mit technischen Maßnahmen entsprechend dem heutigen Stand der Technik erreicht werden. Die Schiffe der Bestandsflotte können 15 % oder 25 % weniger CO_2 relativ zu den $EEDIS_{\text{Trendlinie}}$ (Basis) emittieren. Um jedoch eine absolute Reduzierung der CO_2 -Emission von 15 % oder 25 % zu erzielen, sind umfangreiche Umbaumaßnahmen, wie beispielsweise eine Formänderung des Hinterschiffes und/oder des Vorschiffes, eine Optimierung der Propulsions- und Manövrieranlage und/oder eine Schiffsverlängerung notwendig.

Die erstellten Energie-Effizienz Indizes für Binnenschiffe sind ein Beitrag zur Erfassung der CO₂-Emissionen des Güterverkehrs auf den Binnenwasserstraßen. Die gesellschaftspolitische Forderung, die CO₂-Emissionen bezogen auf das Jahr 1990 deutlich zu senken, setzt voraus, dass die derzeitigen Emissionen der Binnenschiffe quantifiziert und Veränderungen festgestellt werden können. Die zurückliegenden Entwicklungen im Binnenschiffbau sowie Optimierungen der Betriebsabläufe, die zu einer Reduzierung der Emissionen führten, konnten für den wasserseitigen Transport nicht quantifiziert werden. Mit Hilfe von Energie-Effizienz Indizes mit vorgegebenen Rahmenbedingungen ist es möglich, den aktuellen Status zu erfassen und Optimierungen zu bewerten. Gemessen an der zentralen Bedeutung der Energie-Effizienz Indizes für die Bewertung der CO₂-Emissionen können die Rahmenbedingungen für die Indizes des vorliegenden Berichtes zu modellversuchslastig relativ zu den Realbedingungen sein, so dass stärkere Abgrenzungen nötig sein können. Deshalb empfehlen wir die Fortsetzung des Projektes, mit dem Schwerpunkt „Großausführungsmessungen zur Überprüfung und Sicherstellung der Rahmenbedingungen der Energie-Effizienz-Indizes im Realbetrieb“.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V. (DST) beauftragt, ein Konzept zur Beurteilung des Energieverbrauchs von Binnenschiffen zu entwickeln und auszuarbeiten. Der bevorzugte Ansatz beruht auf der aus der Seeschifffahrt bekannten Vorgehensweise mit sogenannten Energie-Effizienz Indizes (*EEDI*, *EEOI* u. a.).

Der Energy-Efficiency Design-Index ist für die Seeschifffahrt entsprechend der Gleichung (1) definiert und wird in $\frac{\text{g CO}_2}{\text{t kn}}$ angegeben.

$$EEDI = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_{ME}}{V_{ref} \cdot dw} \quad (1)$$

<i>EEDI</i>	$[\frac{\text{g CO}_2}{\text{t kn}}]$	Energie-Effizienz Design-Index
<i>CF</i>	$[\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}]$	CO ₂ -Äquivalent von Diesel (3,206 $\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}$)
<i>SFC</i>	$[\frac{\text{g Diesel}}{\text{kWh}}]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch (215 g/kWh)
<i>P_{ME}</i>	[kW]	75 % der gesamten installierten Antriebsleistung
<i>V_{ref}</i>	[kn]	Referenzgeschwindigkeit im tiefem Wasser und ohne Seegang
<i>dw</i>	[t]	Tragfähigkeit

Der CO₂-Äquivalent *CF* von 3,206 $\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}$ entspricht der Vorgabe gemäß MEPC 245(66) „2014 Guidelines on the Calculation of the Attained EEDI for New Ships“, ISO 8217“.

In MEPC 215(63) “2012 Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use with the Energy Efficiency Design Index EEDI”, wird der spezifische Kraftstoffverbrauch *SFC* von 215 g/kWh angegeben.

Der Energie-Effizienz Operational-Indicator ist für die Seeschifffahrt entsprechend der Gleichung (2) definiert und wird in $\frac{\text{g CO}_2}{\text{t kn}}$ angegeben.

$$EEOI = \frac{FC_j \cdot CF_j}{m_{cargo} \cdot D} \quad (2)$$

<i>EEOI</i>	$[\frac{\text{g CO}_2}{\text{t nm}}]$	Energie-Effizienz Betriebs-Indikator
<i>FC</i>	$[g_{Diesel}]$	Masse des verbrauchten Kraftstoffes
<i>CF</i>	$[\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}]$	CO ₂ -Äquivalent von Diesel (3,206 $\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}$)
<i>m</i>	[t]	Ladungsmenge
<i>D</i>	[nm]	Entfernung
<i>j</i>	-	Transportnummer

Neu gebaute Seeschiffe müssen bereits seit dem 1. Januar 2013 Grenzwerte für einen Energy-Efficiency Design-Index (*EEDI*) einhalten und erhalten ein internationales Zertifikat über die Energieeffizienz (*IEE*). Der *EEDI* gibt die Menge des emittierten Klimagases CO₂ im Verhältnis zur Transportleistung an und soll stets die Entwicklung innovativer technischer Komponenten im Schiffsentwurf vorantreiben, die zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs und damit der CO₂-Emission führen.

Neben dem *EEDI* hat sich der Energie-Effizienz Operational-Indicator (*EEOI*) etabliert und ermöglicht dem Schiffsbetreiber, die Energieeffizienz seines in Fahrt befindlichen Schiffes anhand des tatsächlich verbrauchten Treibstoffes zu beurteilen. Sämtliche technische Maßnahmen am Schiff und z. B. Verbesserungen in der Routenplanung oder durch nautische Assistenzsysteme spiegeln sich unmittelbar im *EEOI* wider. Der *EEOI* wird in ähnlicher Form wie der *EEDI* berechnet, jedoch erfasst der *EEOI* die tatsächlichen CO₂-Emissionen während des Schiffsbetriebs relativ zu dem Produkt aus der beförderten Ladungsmenge und dem Transportweg.

Die Entwicklung beider Indizes begann etwa zu Beginn der 1990er Jahre und wird fortlaufend dem Stand der Technik angepasst. Dennoch werden noch nicht alle Schiffstypen berücksichtigt. Insbesondere Schiffe, die Einschränkungen aufgrund des Handels oder den örtlichen Gegebenheiten unterliegen und keine Seeschiffe sind, werden u. a. noch nicht erfasst.

Ein analoges Bewertungssystem der Energie-Effizienz für Binnenschiffe wird als zeitgemäß angesehen und birgt folgende Vorteile:

1. Der Schiffseigner wird bei seinen Investitionsentscheidungen unterstützt, weil eine Bewertung seines Schiffes in Bezug auf die Energieeffizienz bzw. die CO₂-Emissionen vorgenommen wird. Gleichmaßen erhöht eine gute Einstufung den Wiederverkaufswert seines Schiffes.
2. Werften wird es erleichtert, energie- oder klimaeffiziente Schiffsneubauten zu verkaufen, da der Nutzen der erhöhten Investitionskosten durch die günstige Einstufung belegt wird.
3. Ökonomische Anreizsysteme erhalten eine einfach handhabbare und transparente Basis. Schiffen mit einer guten Klassifizierung können z. B. größere Abschläge bei Hafen- oder Wasserstraßenabgaben gewährt werden als Schiffen mit einer schlechteren oder niedrigeren Einstufung.
4. Staatliche Subventionssysteme (hier u. a. das BMVI-Förderprogramm) erhalten bei einer Berücksichtigung der Energieeffizienz eine breitere und vor allem maßnahmenunabhängige Bezugsbasis. Die Subvention kann auf die Erreichung eines bestimmten Ziels (beispielsweise beste Energieverbrauchsklasse) abgestellt werden. Dem Schiffseigner steht es dann frei, die für die Erreichung des Ziels bestgeeignete Maßnahme auszuwählen.
5. Die Klassifizierung des Energieverbrauchs könnte auch direkt als ein wichtiges Element in ein Umweltzertifizierungssystem (Green Label, blauer Engel) von Binnenschiffen aufgenommen werden.

1.2 Zielsetzung und Bedingungen

Vor dem zuvor geschilderten Hintergrund sollten die Grundlagen und Vorschläge für Energie-Effizienz Indizes für Binnenschiffe erarbeitet werden. Dabei sind die Rahmenbedingungen von Binnenschiffen bei Fahrt auf unterschiedlichen Binnengewässern zu berücksichtigen und die geeigneten Kriterien für die Bewertung der Energieeffizienz aufzuzeigen. Der verfolgte Ansatz sollte sich dabei nicht nur auf Neubauten beschränken, sondern auch die bestehende Binnenschiffsflotte mit einbeziehen.

Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines umfassenden Energie-Effizienz Index für Binnenschiffe. Dabei sind Abstufungen bzw. Untervarianten z. B. für unterschiedliche Schiffstypen und -größen als Möglichkeit anzusetzen. Es soll eine Grobabschätzung für alle Fahrzeuge erarbeitet und eine Feinabschätzung beispielsweise für einzelne Schiffskonfigurationen, wie z. B. Einzelfahrer oder Schubverbände, vorgelegt werden.

1.3 Allgemeines Konzept

Das allgemeine Konzept zur Beurteilung der Energie-Effizienz von Binnenschiffen greift die Vorgehensweise in der Seeschifffahrt auf. Es wurde eine an die Binnenschifffahrt angepasste Formulierung des *EEDI* vorgenommen. Mit dieser wurden Leistungsprognosen aus Modellversuchen analytisch ausgewertet. Aus den Ergebnissen der Regressionsanalysen wurden geeignete *EEDI*-Trendlinien abgeleitet und vorgeschlagen.

2 Berechnungsansatz und Vorgehensweise

Zunächst wurde eine mathematische Formulierung für den $EEDI_{\text{Binnen}}$ erarbeitet, siehe Gleichungen (3) und (4). Je nach Schiffstyp wird die Tragfähigkeit dw durch die Verdrängungsmasse Δ ersetzt.

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

oder

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot \Delta} \quad (4)$$

CF	$\left[\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}} \right]$	CO ₂ -Äquivalent von Diesel (3,206 $\frac{\text{g CO}_2}{\text{g Diesel}}$)
SFC	$\left[\frac{\text{g Diesel}}{\text{kWh}} \right]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch (220g/kWh)
$P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})$	[kW]	eingesetzte Wellenleistung, abhängig vom Schiffstyp und/oder der Fahrrichtung zu Berg oder zu Tal oder einer mittleren Wellenleistung
$V_{\text{üG}}$	[km/h]	Geschwindigkeit über Grund
dw	[t]	Tragfähigkeit
Δ	[t]	Verdrängungsmasse

Der CO₂-Äquivalent CF von 3,206 $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{g}_{\text{Diesel}}$ wurde gemäß MEPC 245(66) „2014 Guidelines on the Calculation of the Attained EEDI for New Ships“, ISO 8217“ verwendet.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch SFC beträgt gemäß MEPC 215(63) “2012 Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use with the Energy-Efficiency Design-Index EEDI” 215 g/kWh. Dieser Kraftstoffverbrauch bezieht sich auf eine Leistung von 75 % der Nennleistung. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist bei einer geringeren Teillast als 75 % der Nennleistung höher. Eine Auswertung der Prüfstandprotokolle von Binnenschiffsmotoren ergab, dass innerhalb eines Leistungsbereiches von 25 % bis 100 % Nennleistung ein mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch von 220 g/kWh benötigt wird. Dieser Verbrauch wurde daher einheitlich verwendet.

Es wird kein prozentualer Anteil der Nennleistung des Motors eingesetzt, weil gleiche Schiffe aus verschiedenen Gründen unterschiedlich hoch motorisiert werden. Die zu verwendende Wellenleistung $P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})$ wurde basierend auf Modellversuchsergebnissen bestimmt und hängt vom Schiffstyp und von den Fahrwasserverhältnissen (Berg- oder Talfahrt oder tiefes Fahrwasser und keine Strömung) ab.

Mit Hilfe der Gleichungen (3) und/oder (4) wurden $EEDI$ -Werte der Fahrzeugvarianten berechnet und in Form von Punktdiagrammen dargestellt. Für die so erstellten Daten wurden obere Begrenzungen als Einhüllende ermittelt, die folglich von den Hauptparametern der Fahrzeuge (Tiefgang, Verdrängungsmasse oder Tragfä-

higkeit, Schiffsbreite, Schiffslänge und Wellenleistungen) und von den Wasserstraßenverhältnissen (Wassertiefe, Fahrwasserbreite und Strömung) abhängig sind.

Weiterhin wurde angestrebt, die Streubreiten bei den Energie-Effizienz Indizes für unterschiedliche Bedingungen (Wassertiefe, Tiefgang etc.) und Schiffstypen bzw. Formationen durch geeignete Regressionen zu minimieren und so den Geltungsbereich der *EEDIs* zu vergrößern und die Anzahl der benötigten Unterkategorien zu reduzieren.

Die Tiefen-Froude-Zahl Fr_h und Geschwindigkeit über Grund $V_{üG}$ waren dafür bei der Fahrt der Fahrzeuge auf eingeschränktem Fahrwasser geeignet. Aber auch eine gezielte Eingrenzung der eingesetzten Wellenleistung konnte zu einer Verringerung der Datenstreuung führen. Beispielsweise kann die Wellenleistung durch eine Funktion, abhängig von der Wassertiefe, der Tragfähigkeit oder der Verdrängungsmasse sowie der Schiffsbreite, beschrieben werden.

Es wurden zusammenfassend drei Bewertungsansätze untersucht:

1. Analyse über die Tiefen-Froude-Zahl Fr_h

Unter Festlegung einer wassertiefenabhängigen Tiefen-Froude-Zahl,

$$Fr_h = \frac{V_{üG}}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (5)$$

Fr_h	[-]	Tiefen-Froude-Zahl
$V_{üG}$	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit über Grund
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Wassertiefe

werden die Modellversuchsdaten der Fahrzeuge analysiert und ein $EEDI_{\text{Binnen}}$ unter Berücksichtigung der Tragfähigkeit und der Verdrängungsmasse ermittelt.

2. Regression der Geschwindigkeit über Grund mit Hilfe der Wassertiefe, der Verdrängung bzw. der Tragfähigkeit

Mit der Bewertung nach der Geschwindigkeit über Grund wurde das gleiche Ziel verfolgt, dass eine geringe Streubreite der *EEDI*-Daten vorliegt. Dazu wurde die Geschwindigkeit über Grund durch einen funktionalen Zusammenhang beschrieben, wobei die Wassertiefe und zum Teil die Schiffsbreite neben der Tragfähigkeit oder der Verdrängungsmasse als variabler Parameter verwendet werden. Die Wellenleistung wurde entsprechend der ermittelten Geschwindigkeit über Grund aus den Modellversuchsdaten entnommen.

3. Regression der Wellenleistung mit Hilfe der Wassertiefe, der Tragfähigkeit und der Schiffsbreite

Die Bewertung nach der tragfähigkeitsabhängigen Wellenleistung sieht vor, dass die Wellenleistung durch einen funktionalen Zusammenhang beschrieben wird. Dabei wurde die Wassertiefe und zum Teil die Schiffsbreite neben der Tragfähigkeit oder der Verdrängungsmasse als variabler Parameter verwendet.

Die Geschwindigkeit über Grund wurde entsprechend der ermittelten Wellenleistung aus den Modellversuchsdaten entnommen.

Weiterhin wurde angestrebt, dass die erforderliche Ausrüstung zur Ermittlung des vorhandenen *EEDI*s angemessen ist und dass das Schiff bzw. die Wasserstraße möglichst geringen Einschränkungen hinsichtlich der Wahl des Tiefgangs bzw. der Wassertiefe unterliegt.

Die erzeugten *EEDI*_{Binnen}-Trendlinien der einzelnen Fahrzeuggruppen wurden mit Hilfe von Ergebnissen aus Großausführungsmessungen verifiziert.

Als Ergebnis dieser analytischen Ausarbeitung wurde zunächst ein Vorschlag für einen allgemeinen *EEDI* erarbeitet. Im Anschluss wurde ein fahrtgebietsabhängiger *EEDI* vorgeschlagen.

3 Hinweise zum Bearbeitungskonzept

Bei der Bearbeitung wurden keine zusätzlichen Verbraucher (Generatoren, Ladungs- oder Ballastpumpen, u.a.) oder regenerative Energiequellen berücksichtigt. Diese Informationen sind in der Regel zum Zeitpunkt der Modellversuche nicht bekannt und lagen daher dem DST nicht vor. Es werden theoretische Einsatzbedingungen genutzt ohne weitere Zuschläge für weitere Leistungsverluste entlang des Antriebsstrangs.

Die nachfolgend aufgeführten Gleichungen für die Leistungsbestimmung bzw. für die in der Studie ermittelten und vorgeschlagenen $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien (Einhüllenden) sind durch Einsatz von griechischen Symbolen anonymisiert. Es handelt sich hierbei um Konstanten, die mit α_{1-14} , β_{1-13} , γ_{1-8} , δ_{1-7} , ε_{1-7} , ζ_{1-5} , η_{1-4} , und $\theta_{1,2}$ bezeichnet sind. Die Charakteristika der Gleichungen sind jedoch abgebildet.

In dieser Kurzfassung wird der Fokus auf die Vorgehensweise bzw. das vorgeschlagene Konzept bei der Beurteilung der Energie-Effizienz von Binnenschiffen gelegt. Die damit verknüpften Randbedingungen werden aufgezeigt.

Dieses Bearbeitungskonzept stellt eine Möglichkeit zur Beurteilung der Energie-Effizienz von Binnenschiffen dar und erfordert eine umfassende Validierung und ggf. Anpassung mit Hilfe von gezielt auszuwählenden Großausführungsmessungen. Die Anzahl der Großausführungsdaten, die im Rahmen dieser Arbeit herangezogen wurde, ist beschränkt.

4 Vorschlag für einen allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$

4.1 Fahrzeugklassen und Randbedingungen

Bei diesem Vorschlag wird lediglich zwischen zwei Fahrzeuggruppen unterschieden:

- Fahrzeuggruppe A:
 - Fahrzeugklasse 1, Trockengutschiffe und Containerschiffe, MS
 - Fahrzeugklasse 2, Tankschiffe, TMS
 - Fahrzeugklasse 3, Schubverbände, SV
- Fahrzeuggruppe B:
 - Fahrzeugklasse 4, Fahrgastschiffe, FGS

Für alle Fahrzeugklassen wird dieselbe $EEDI$ -Trendlinie zur Beurteilung herangezogen, siehe Abb. 1. Die einzusetzende Leistung und die Randbedingungen unterscheiden sich jedoch.

4.1.1 Fahrzeugklasse 1 - 3

Der Nachweis über die Einhaltung eines $EEDI$ s muss bei einer Wassertiefe $h > 7,5$ m, z. B. auf Seeschiffahrtsstraßen, ggf. auf Binnenseen erbracht werden und folgende Randbedingungen erfüllen:

- a) $T = 1,5 \cdot$ Propellerdurchmesser in den Grenzen zwischen $2,0 \text{ m} \leq T \leq 3,2 \text{ m}$
- b) Wellenleistung entsprechend dem Schiffstyp nach Gleichung (6), (7) oder (8)

$$P_{D \text{ MS Mittel}} = \alpha_1 \cdot dw \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

$$P_{D \text{ TMS Mittel}} = \alpha_2 \cdot dw \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

$$P_{D \text{ SV Mittel}} = \left(\alpha_3 + \beta_1 \cdot \text{EXP} \left(\frac{B}{-\gamma_1} \right) \right) \cdot dw \quad [\text{kW}] \quad (8)$$

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ wird mit der entsprechend eingestellten Wellenleistung $P_{D \text{ (Schiffstyp) (Mittel)}}$ die Geschwindigkeit über Grund gemessen und der $EEDI_{\text{Binnen}}$ nach der Gleichung (3) berechnet.

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_{D \text{ (Schiffstyp) (Berg oder Tal oder Mittel)}}}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der nach Gleichung (3) berechnete $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (9) berechnete Index sein und somit unterhalb der $EEDI_{\text{Trendlinie}}$ der Abb. 1 liegen.

$$EEDI_{\text{Trendlinie}} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot \text{EXP} \left(\frac{dw}{-\gamma_2} \right) + \vartheta_1 \text{EXP} \left(\frac{dw}{-\delta_1} \right) \quad (9)$$

CF	$\left[\frac{g_{CO_2}}{g_{Diesel}} \right]$	CO ₂ -Äquivalent von Diesel (3,206 $\frac{g_{CO_2}}{g_{Diesel}}$)
SFC	$\left[\frac{g_{Diesel}}{kWh} \right]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch (220 $\frac{g_{Diesel}}{kWh}$)
P_D (Schiffstyp) (Mittel)	[kW]	mittlere Wellenleistung, abhängig vom Schiffstyp
$V_{üG}$	$\left[\frac{km}{h} \right]$	Geschwindigkeit über Grund
dw	[t]	Tragfähigkeit
$EEDI_{Binnen}$	$\left[\frac{g_{CO_2}}{t km} \right]$	Energie-Effizienz Design-Index Binnen

4.1.2 Fahrzeugklasse 4

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{Binnen}$ gelten für Fahrgastschiffe folgende Rahmenbedingungen:

- Der Tiefgang entspricht dem Konstruktionstiefgang, ggf. mit geringen Abweichungen zwischen +/- 5 % und soll in den Grenzen $0,6 \text{ m} < T < 2,1 \text{ m}$ liegen.
- Die einzusetzende Wellenleistung ist nach der Gleichung (10) zu ermitteln

$$P_{D \text{ FGS Mittel}} = \left(\alpha_5 + \beta_3 \cdot \text{EXP} \left(\frac{B}{-\gamma_3} \right) \right) \cdot \Delta \quad [\text{kW}] \quad (10)$$

Mit der eingestellten Wellenleistung $P_{D \text{ FGS Mittel}}$ wird die erreichte Geschwindigkeit $V_{üG}$ gemessen und der $EEDI_{Binnen}$ nach der Gleichung (4) berechnet.

$$EEDI_{Binnen} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D \text{ (Schiffstyp) (Berg oder Tal oder Mittel)}}{V_{üG} \cdot \Delta} \quad (4)$$

Der nach Gleichung (4) berechnete $EEDI_{Binnen}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (11) berechnete Index sein und somit unterhalb der $EEDI_{Trendlinie}$ der Abb. 1 liegen.

$$EEDI_{Trendlinie} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot \text{EXP} \left(\frac{\Delta}{-\gamma_2} \right) + \vartheta_1 \cdot \text{EXP} \left(\frac{\Delta}{-\delta_1} \right) \quad (11)$$

CF	$\left[\frac{g_{CO_2}}{g_{Diesel}} \right]$	CO ₂ -Äquivalent von Diesel (3,206 $\frac{g_{CO_2}}{g_{Diesel}}$)
SFC	$\left[\frac{g_{Diesel}}{kWh} \right]$	spezifischer Kraftstoffverbrauch (220 $\frac{g_{Diesel}}{kWh}$)
$P_{D \text{ FGS Mittel}}$	[kW]	mittlere Wellenleistung
$V_{üG}$	$\left[\frac{km}{h} \right]$	Geschwindigkeit über Grund
Δ	[t]	Verdrängungsmasse
$EEDI_{Binnen}$	$\left[\frac{g_{CO_2}}{t km} \right]$	Energie-Effizienz Design-Index Binnen

Bei der Bewertung von Fahrgastschiffen wird an Stelle der Tragfähigkeit die Verdrängungsmasse eingesetzt, damit keine weiteren Gruppierungen innerhalb der

Fahrzeugklasse 4 erfolgen müssen. Dies gilt sowohl bei der Bemessung der Wellenleistung als auch bei der $EEDI$ -Trendlinie.

Prinzipiell könnten alle Fahrzeuge, die ein Rheinschiffsattest besitzen oder anstreben, die zuvor genannten Bedingungen für einen $EEDI$ einhalten. Einschränkend dabei ist, dass die Untersuchung auf nahezu tiefem, strömungslosem Fahrwasser durchgeführt werden muss. Ggf. können geringe Strömungseinflüsse durch gezielte Berg- und Talfahrten minimiert werden.

Für Neubauten, die die Untersuchungen für das Schiffszeugnis in der Regel in den Niederlanden (Haringvliet) durchführen, könnten gleichzeitig dort die $EEDI$ -Fahrten erfolgen. Die deutsche Bestandsflotte müsste beispielsweise auf Binnenseen oder auf Seeschiffahrtsstraßen (Wasserstraßenzone 2) ausweichen, wobei der Tiefgang aufgrund der Anforderungen des Fahrtgebietes eingeschränkt sein könnte (Freibord) oder das Fahrzeug kein Schiffszeugnis für dieses Fahrtgebiet hat.

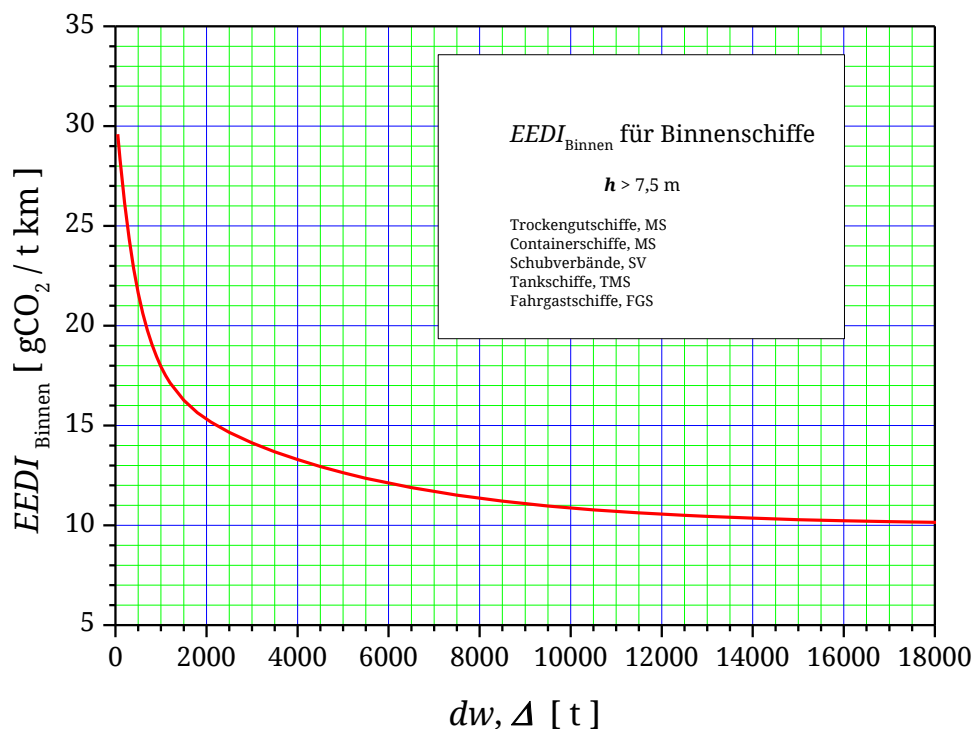


Abb. 1: $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinie für Binnenschiffe

Für einen zusätzlichen allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$ könnten die Randbedingungen auch für andere geeignete Streckenabschnitte mit der gleichen Methodik aufgestellt werden. Dazu müssen geeignete Testgebiete mit definierten Gewässerparametern (ohne Strömung) ausgewiesen werden. Je nach Gewässerparameter dieser Testgebiete werden dann die Randbedingungen formuliert.

5 Vorschlag für einen fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$

Unter Berücksichtigung der Wassertiefe, der Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird ein fahrtgebietsabhängiger $EEDI_{\text{Binnen}}$ vorgeschlagen.

Zwei unterschiedliche Fahrtgebiete werden dabei unterschieden und gemäß der Definition in der Binnenschiffsuntersuchungsordnung (BinSchUO) bezeichnet.

- Die Zone 3, Rhein
- Die Zone 4

Je nach Fahrtgebiet werden die unterschiedlichen Fahrzeugarten in 4 Klassen eingeteilt. Für diese sind die unten stehenden Randbedingungen einzuhalten.

Die Probefahrt ist für die Bergfahrt durchzuführen. Die dafür entsprechend einzusetzende Wellenleistung ist rechnerisch zu ermitteln.

5.1 Wasserstraßen der Zone 3 (Rhein)

5.1.1 Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in der Bergfahrt gelten für Trockengutschiffe und Containerschiffe folgende Rahmenbedingungen:

- Tiefgang: $T = 1,5 \cdot \text{Propellerdurchmesser}$ in den Grenzen $2,0 \text{ m} \leq T \leq 2,8 \text{ m}$
- Länge: $40,0 \text{ m} \leq L \leq 135,0 \text{ m}$
- Breite: $5,0 \text{ m} < B < 17,0 \text{ m}$
- Tragfähigkeit: $250 \text{ t} \leq dw \leq 6000 \text{ t}$
- Strömungsgeschwindigkeit: $2,0 \text{ km/h} \leq V_{\text{str}} \leq 8,0 \text{ km/h}$
- Wassertiefe: $3,5 \text{ m} \leq h \leq 7,5 \text{ m}$
- Wassertiefen/Tiefgangsverhältnis: $h/T \geq 1,40$

Die einzusetzende Wellenleistung ist mit Hilfe der Gleichung (12) zu ermitteln.

$$P_{\text{D Berg MS}} = \left(\alpha_6 + \beta_4 \cdot \text{EXP}(-\gamma_4 \cdot B) - \delta_2 \cdot \text{EXP}\left(\frac{h}{-\varepsilon_1}\right) \right) \cdot dw \quad [\text{kW}] \quad (12)$$

Bei der Probefahrt muss die Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein. Mit der eingestellten Wellenleistung $P_{\text{D Berg MS}}$ wird die Geschwindigkeit $V_{\text{üG}}$ gemessen. Der $EEDI_{\text{Binnen}}$ errechnet sich nach der Gleichung (3).

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_{\text{D}}(\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der nach Gleichung (3) berechnete $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (13) berechnete Index sein und somit unterhalb der strömungsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$ Trendlinie der Abb. 2 liegen.

$$EEDI_{\text{MS Berg Trendlinie}} = (\alpha_7 + \beta_5 \cdot V_{\text{str}} + \gamma_5 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\delta_3 + \varepsilon_2 \cdot V_{\text{str}} - \zeta_1 \cdot V_{\text{str}}^2 + \eta_1 \cdot V_{\text{str}}^3) \cdot \text{EXP}\left(\frac{dw}{-\theta_1}\right) \quad (13)$$

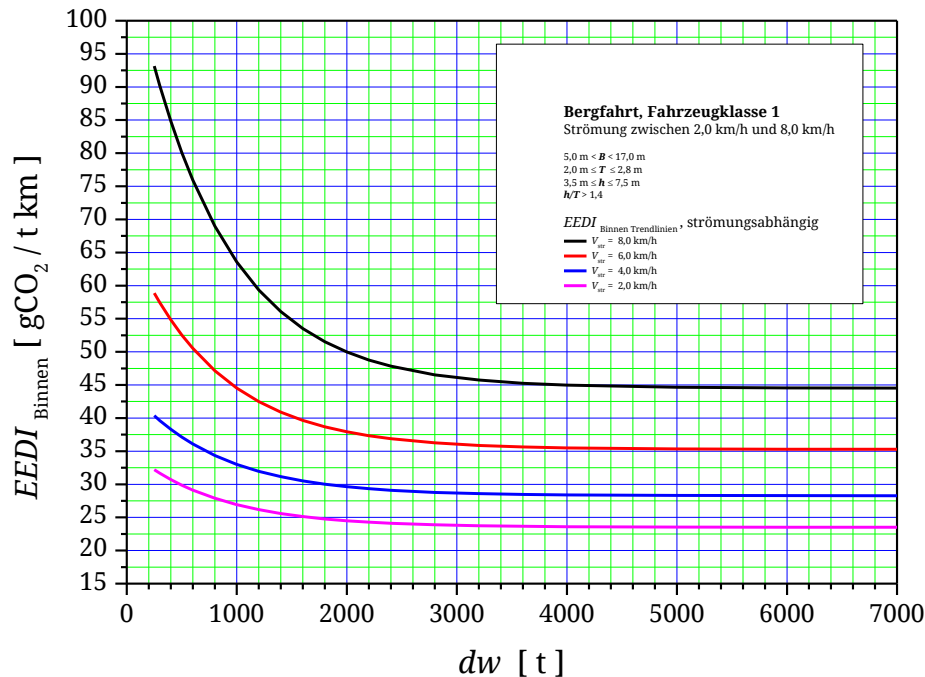


Abb. 2: $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 1

5.1.2 Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in der Bergfahrt gelten für Tankschiffe folgende Rahmenbedingungen:

- Tiefgang: $T = 1,5 \cdot \text{Propellerdurchmesser}$ in den Grenzen $2,0 \text{ m} \leq T \leq 2,8 \text{ m}$
- Länge: $40,0 \text{ m} \leq L \leq 135,0 \text{ m}$
- Breite: $5,0 \text{ m} \leq B \leq 17,0 \text{ m}$
- Tragfähigkeit: $250 \text{ t} \leq dw \leq 6000 \text{ t}$
- Strömungsgeschwindigkeit: $2,0 \text{ km/h} \leq V_{\text{str}} \leq 8,0 \text{ km/h}$
- Wassertiefe: $3,5 \text{ m} \leq h \leq 7,5 \text{ m}$
- Wassertiefen/Tiefgangsverhältnis: $h/T \geq 1,40$

Die Wellenleistung ist mit Hilfe der Gleichung (14) zu ermitteln.

$$P_{D \text{ Berg TMS}} = P_{D \text{ Berg MS}} \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

Bei der Probefahrt muss die Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein und mit der eingestellten Wellenleistung $P_{D \text{ Berg TMS}}$ wird die Geschwindigkeit $V_{\text{üg}}$ gemessen.

Der $EEDI_{\text{Binnen}}$ errechnet sich nach der Gleichung (3).

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üg}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der nach Gleichung (3) berechnete $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (15) berechnete Index sein und somit unterhalb der strömungsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$ Trendlinie der Abb. 3 liegen.

$$EEDI_{\text{TMS Berg Trendlinie}} = (\alpha_8 + \beta_6 \cdot V_{\text{str}} + \delta_4 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\gamma_6 + \varepsilon_3 \cdot V_{\text{str}} - \zeta_2 \cdot V_{\text{str}}^2 + \eta_2 \cdot V_{\text{str}}^3) \cdot \text{EXP}\left(\frac{dw}{-\theta_2}\right) \quad (15)$$

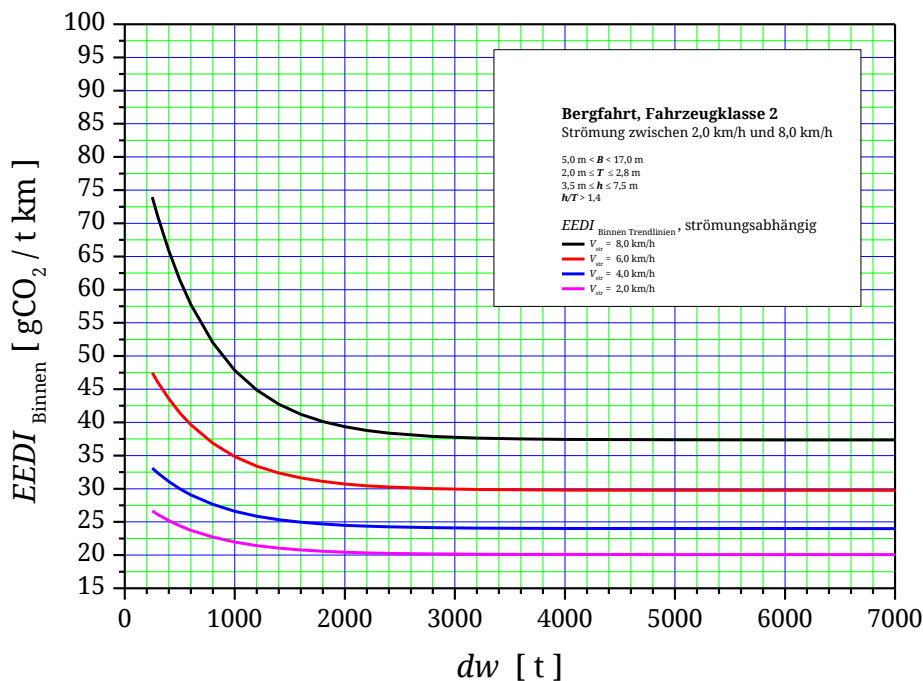


Abb. 3: $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 2

5.1.3 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)

Zu der Fahrzeuggruppe 3 gehören Schubverbände, bestehend aus einem Schubboot und einem oder mehreren Schubleichtern sowie Schubverbände, bestehend aus einem Einzelfahrer mit einem, zwei und drei Schubleichtern. 3-spurig/1-gliedrige Schubformationen können bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

- a) Tiefgang: $T = 1,5 \cdot \text{Propellerdurchmesser}$ in den Grenzen $2,0 \text{ m} \leq T \leq 3,0 \text{ m}$
- b) Länge (nur Leichterformation): $76,5 \text{ m} \leq L \leq 230,0 \text{ m}$
- c) Breite: $9,0 \text{ m} \leq B \leq 34,4 \text{ m}$
- d) Tragfähigkeit: $500 \text{ t} \leq dw \leq 18000 \text{ t}$
- e) Strömungsgeschwindigkeit: $2,0 \text{ km/h} \leq V_{\text{str}} \leq 6,0 \text{ km/h}$
- f) Wassertiefe: $3,5 \text{ m} \leq h \leq 7,5 \text{ m}$
- g) Wassertiefen/Tiefgangsverhältnis: $h/T \geq 2,0$

Die Wellenleistung ist mit Hilfe der Gleichung (16) zu ermitteln.

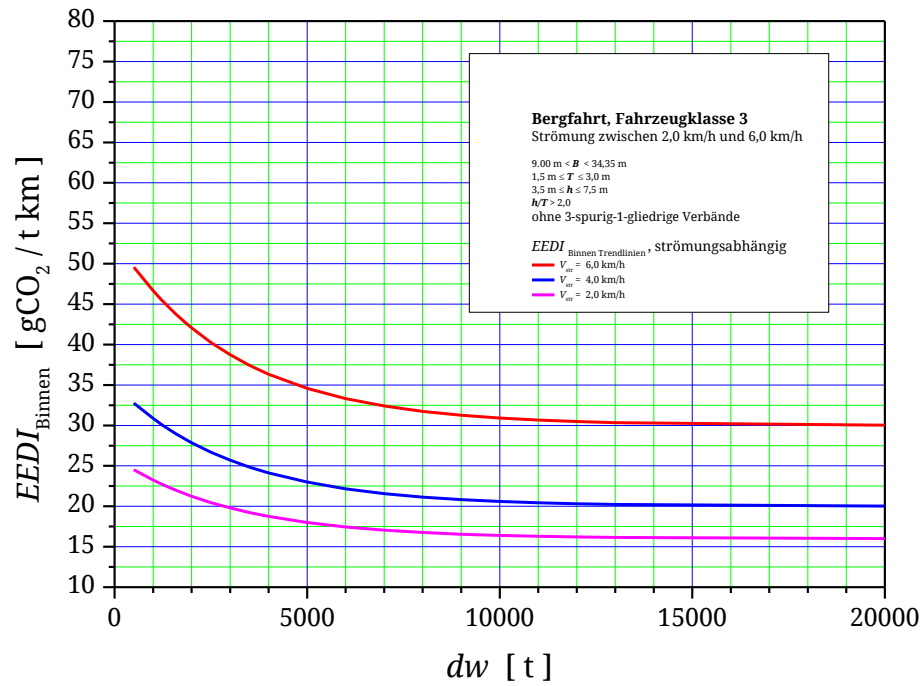
$$P_{D \text{ Berg SV}} = (\alpha_9 + \beta_7 \cdot \text{EXP}(-\gamma_4 \cdot B) - \delta_5 \cdot \text{EXP}\left(\frac{h}{-\varepsilon_4}\right)) \cdot dw \quad [\text{kW}] \quad (16)$$

Bei der Probefahrt muss die Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein und mit der eingestellten Wellenleistung $P_{D \text{ Berg SV}}$ wird die Geschwindigkeit $V_{\text{üG}}$ gemessen. Der $EEDI_{\text{Binnen}}$ errechnet sich nach der Gleichung (3).

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_{D \text{ (Schiffstyp) (Berg oder Tal oder Mittel)}}}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der nach Gleichung (3) berechnete $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (17) berechnete Index sein und somit unterhalb der strömungsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$ Trendlinie der Abb. 4 liegen.

$$EEDI_{\text{SV BergTrendlinie}} = (\alpha_8 - \beta_8 \cdot V_{\text{str}} + \delta_6 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\gamma_7 + \varepsilon_5 \cdot V_{\text{str}} + \zeta_3 \cdot V_{\text{str}}^2) \cdot \text{EXP}(dw / -\eta_3) \quad (17)$$

Abb. 4: $EEDI_{Binnen}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 3

5.1.4 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in der Bergfahrt gelten für Fahrgastschiffe folgende Rahmenbedingungen:

- a) Tiefgang: $0,6 \text{ m} \leq T \leq 2,1 \text{ m}$
- b) Länge: $26,0 \text{ m} \leq L \leq 135,0 \text{ m}$
- c) Breite: $5,0 \text{ m} \leq B \leq 14,0 \text{ m}$
- d) Verdrängung: $50 \text{ t} \leq \Delta \leq 3000 \text{ t}$
- e) Strömungsgeschwindigkeit: $2,0 \text{ km/h} \leq V_{\text{str}} \leq 6,0 \text{ km/h}$
- f) Wassertiefe: $3,5 \text{ m} \leq h \leq 7,5 \text{ m}$
- g) Wassertiefen/Tiefgangsverhältnis: $h/T \geq 1,40$

Die Wellenleistung ist mit Hilfe der Gleichung (18) zu ermitteln.

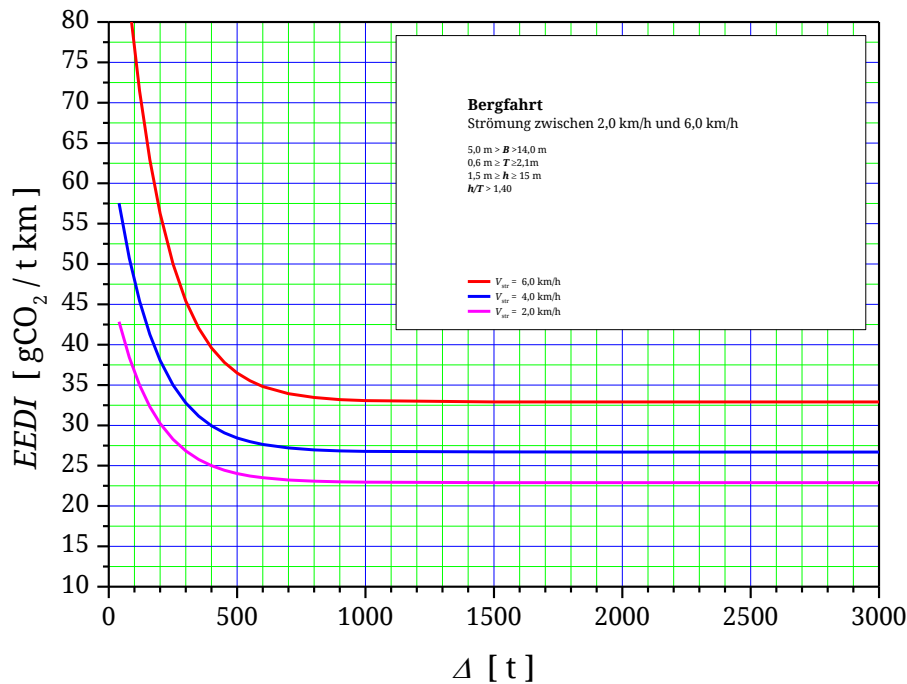
$$P_{D \text{ Berg FGS}} = (\alpha_{10} + \beta_9 \cdot \text{EXP}(-\gamma_4 \cdot B) - \varepsilon_6 \cdot \text{EXP}\left(\frac{h}{-\zeta_4}\right)) \cdot \Delta \quad [\text{kW}] \quad (18)$$

Bei der Probefahrt muss die Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein und mit der eingestellten Wellenleistung $P_{D \text{ Berg FGS}}$ wird die Geschwindigkeit $V_{\text{üG}}$ gemessen. Der $EEDI_{\text{Binnen}}$ errechnet sich nach der Gleichung (4).

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_{D \text{ (Schiffstyp) (Berg oder Tal oder Mittel)}}}{V_{\text{üG}} \cdot \Delta} \quad (4)$$

Der nach Gleichung (4) berechnete $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach der Gleichung (19) berechnete Index sein und somit unterhalb der strömungsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$ Trendlinie der Abb. 5 abgelesen werden.

$$EEDI_{\text{FGS Berg Trendlinie}} = (\alpha_{11} + \beta_{10} \cdot V_{\text{str}} + \gamma_8 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\delta_7 - \varepsilon_7 \cdot V_{\text{str}} + \zeta_5 \cdot V_{\text{str}}^2) \cdot \text{EXP}(\Delta / -\eta_4) \quad (19)$$

Abb. 5: $EEDI_{Binnen}$ -Trendlinien der Fahrzeugklasse 4

5.2 Wasserstraßen der Zone 4

Repräsentativ für die Wasserstraßen der Zone 4 wird der Kanalquerschnitt mit dem standardisierten Trapezprofil der ausgebauten Kanäle festgelegt.

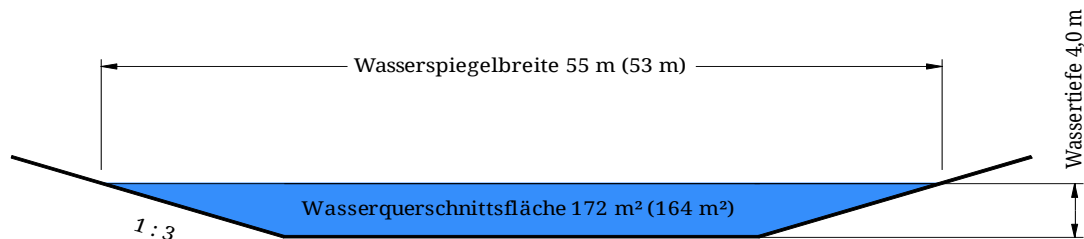


Abb. 6: Kanal mit einem trapezförmigen Querschnitt

Dieser Kanalquerschnitt ist mit geringen Toleranzen der Abmessungen innerhalb der Wasserstraßen der Zone 4 weit verbreitet, beispielsweise große Teilstrecken des Mittellandkanals, des Dortmund-Ems-Kanals, des Elbe-Havel-Kanals, des Elbe-seitenkanals und des Main-Donau-Kanals. Diese Kanäle können mit einem Schiffstiefgang von 2,5 m bzw. 2,8 m befahren werden. Die angrenzenden oder kreuzenden Flüsse und Kanäle können geringer schwankende Wassertiefen haben, so dass die einsetzbaren Tiefgänge geringer sind. Deshalb wird für die Probefahrt im Trapezkanalprofil der zu wählende Tiefgang abhängig von einem Vielfachen des Propellerdurchmessers mit einer maximalen oberen Grenze abhängig gemacht. Diese Eingrenzung erfolgt für Trockengutschiffe, Containerschiffe, Tankschiffe und Schubverbände. Für Fahrgastschiffe wird der Konstruktionstiefgang vorgesehen.

5.2.1 Fahrzeugklasse 1 und 2 (Trockengutschiffe, Containerschiffe und Tankschiffe)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in einem Standardtrapezprofilkanal gelten für Trockengut-, Container- und Tankschiffe folgende Rahmenbedingungen:

- a) Tiefgang: $T = 1,7 \cdot \text{Propellerdurchmesser}$, maximal jedoch $T = 2,5 \text{ m}$
- b) Geschwindigkeit über Grund:
 $V_{\text{üG}} = 10,0 \text{ km/h}$ für Fahrzeuge mit einer Breite von $B < 11,0 \text{ m}$
 $V_{\text{üG}} = 9,4 \text{ km/h}$ für Fahrzeuge mit einer Breite von $B \geq 11,0 \text{ m}$

Die benötigte Wellenleistung wird bei der entsprechenden Geschwindigkeit gemessen. Nach Gleichung (3) wird der $EEDI_{\text{Binnen}}$ bestimmt.

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der ermittelte $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach Gleichung (20) sein.

$$EEDI_{\text{MS Kanal Trendlinie}} = \alpha_{12} - \beta_{11} \cdot dw \quad (20)$$

5.2.2 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in einem Standardtrapezprofilkanal gelten für Schubverbände folgende Rahmenbedingungen:

- a) Tiefgang: $1,7 \cdot \text{Propellerdurchmesser}$, maximal jedoch $T = 2,5 \text{ m}$
- b) Geschwindigkeit über Grund:
 $V_{\text{üG}} = 10,0 \text{ km/h}$ für Verbände mit einer Breite von $B < 11,0 \text{ m}$
 $V_{\text{üG}} = 9,4 \text{ km/h}$ für Verbände mit einer Breite von $B \geq 11,0 \text{ m}$

Die Wellenleistung wird bei der entsprechenden Geschwindigkeit gemessen. Nach Gleichung (3) wird der $EEDI_{\text{Binnen}}$ bestimmt.

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot dw} \quad (3)$$

Der ermittelte $EEDI_{\text{Binnen}}$ soll kleiner als der nach Gleichung (21) sein.

$$EEDI_{\text{SV Kanal Trendlinie}} = \alpha_{13} - \beta_{12} \cdot dw \quad (21)$$

5.2.3 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)

Bei der Probefahrt zur Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ in einem Standardtrapezprofilkanal gelten für Fahrgastschiffe folgende Rahmenbedingungen:

a) Tiefgang: identisch dem Konstruktionstiefgang, maximal jedoch $T = 2,5$ m

b) Geschwindigkeit über Grund:

$$V_{\text{üG}} = 10,0 \text{ km/h für Fahrgastschiffe mit einer Breite von } B < 11,0 \text{ m}$$

$$V_{\text{üG}} = 9,4 \text{ km/h für Fahrgastschiffe mit einer Breite von } B \geq 11,0 \text{ m}$$

Die Wellenleistung wird bei der entsprechenden Geschwindigkeit gemessen. Nach Gleichung (4) wird der $EEDI_{\text{Binnen}}$ bestimmt.

$$EEDI_{\text{Binnen}} = \frac{CF \cdot SFC \cdot P_D (\text{Schiffstyp}) (\text{Berg oder Tal oder Mittel})}{V_{\text{üG}} \cdot \Delta} \quad (4)$$

Eine obere $EEDI_{\text{FGS Kanal}}$ -Trendlinie konnte nicht ermittelt werden, es liegen keine Modell- und Naturversuche vor. Eine erste Orientierung könnte die $EEDI_{\text{MS Kanal}}$ -Trendlinie (20) sein. Für Fahrgastschiffe ist die Verdrängungsmasse anstelle der Tragfähigkeit einzusetzen, entsprechend der Gleichung (22).

$$EEDI_{\text{FGS Kanal Trendlinie}} = \alpha_{14} - \beta_{13} \cdot \Delta \quad (22)$$

6 EEDI s für stufenweise Bewertung

6.1 Stufenweise Bewertung zum allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$

6.1.1 Fahrzeugklasse 1 - 3

Zur Abschätzung einer realistischen Abstufung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ bezüglich der Reduzierung der CO_2 -Emission wird auf die Auswertung des Kapitels 6 Großversuche im Hauptbericht zurückgegriffen. Die nachfolgende Abb. 7 zeigt die obere Hüllkurve ($EEDI_{\text{T-trendlinie}}$), die die Großversuchsdaten abgrenzt und die zugehörigen Datenpunkte. Zusätzlich enthält die Abb. 7 zwei weitere Kurven, die relativ zu der $EEDI_{\text{T-trendlinie}}$ (Basis) eine um 15 % (rote Kurve) und eine um 25 % (grüne Kurve) reduzierte CO_2 -Emission vorsehen. Dabei kann die grüne Kurve in erster Näherung als untere Hüllkurve der Großversuchsdaten angesehen werden. Das heißt, innerhalb der bestehenden Schiffsflotte gibt es Schiffe, die bis zu 25 % weniger CO_2 emittieren relativ zu dem $EEDI_{\text{T-trendlinie}}$ (Basis). Für Schiffsneubauten könnten die Abstufungen eine Orientierung zur zukünftigen Reduzierung der CO_2 -Emission darstellen. Für die Bestandsflotte ist eine absolute Reduzierung der CO_2 -Emission von 15 % oder 25 % nur mit umfangreichen Umbaumaßnahmen, wie beispielsweise eine Formänderung des Hinterschiffes und/oder des Vorschiffes, eine Optimierung der Propulsions- und Manövrieranlage und/oder eine Schiffsverlängerung, möglich.

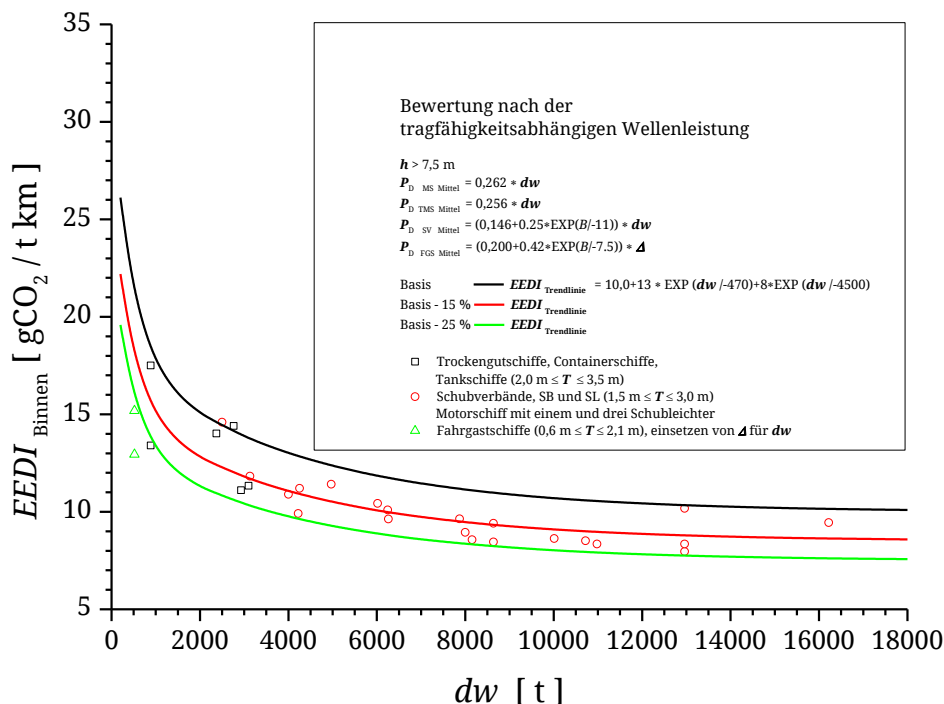


Abb. 7: Stufenweise Bewertung des allgemeinen $EEDI_{\text{Binnen}}$

Die $EEDI_{Trendlinien}$ für eine Verringerung der CO₂-Emission um 15 % und 25 % können in Verbindung mit der Gleichung (9) ausgedrückt werden.

$$\text{Basis:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\delta_1}\right) \quad (9)$$

$$\text{Basis -15 \%:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \left(\alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\delta_1}\right) \right) \cdot 0,85 \quad (23)$$

$$\text{Basis -25 \%:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \left(\alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\delta_1}\right) \right) \cdot 0,75 \quad (24)$$

6.1.2 Fahrzeugklasse 4

Die $EEDI_{Trendlinien}$ für eine mögliche Verringerung der CO₂-Emission um 15 % und 25 % können in Verbindung mit der Gleichung (11) ausgedrückt werden.

$$\text{Basis:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\delta_1}\right) \quad (11)$$

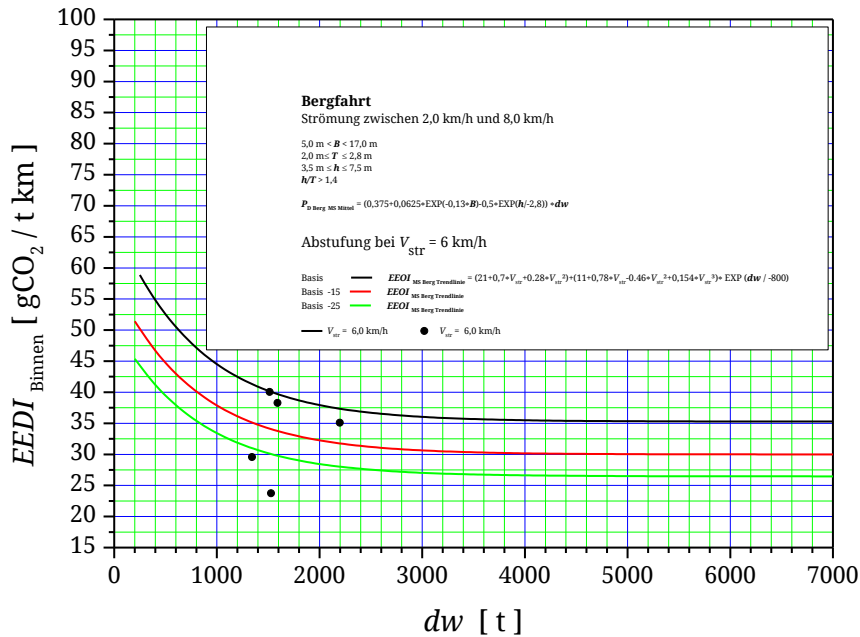
$$\text{Basis -15 \%:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \left(\alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\delta_1}\right) \right) \cdot 0,85 \quad (25)$$

$$\text{Basis -25 \%:} \quad EEDI_{Trendlinie} = \left(\alpha_4 + \beta_2 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\gamma_2}\right) + \vartheta_1 \cdot EXP\left(\frac{\Delta}{-\delta_1}\right) \right) \cdot 0,75 \quad (26)$$

6.2 Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{Binnen}$, Zone 3 (Rhein)

6.2.1 Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)

Für die Fahrzeugklasse 1 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Großversuche mit denen der Modellversuche, dass die Ergebnisse der Großversuche zu einer Anpassung der oberen Hüllkurven geführt hatten. Die Streuung der Großversuchsdaten ermöglicht eine Abstufung von 15 % und 25 %. Die Abb. 8 zeigt die Relationen bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6,0 km/h (schwarze Kurve Basis: $EEDI_{Trendlinie}$ bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6,0 km/h).

Abb. 8 : Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{\text{Binnen}}$

Die grüne Kurve (grüne Kurve Basis -25%: $EEDI_{\text{Trendlinie}}$ bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6,0 km/h) zeigt nicht die untere Hüllkurve, zwei Daten der Großversuchsmessungen liegen noch unterhalb der grünen Kurve, so dass Schiffe der bestehenden Flotte mindestens eine 25 % geringere CO_2 -Emission erreichen relativ zu dem $EEDI_{\text{Trendlinie}}$ (Basis). Bis auf einen Datenpunkt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 8,0 km/h liegen keine weiteren Großversuchsmessungen vor, so dass in erster Näherung für alle Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 2,0 km/h und 8,0 km/h angenommen wird, dass für Neubauten eine Verringerung der CO_2 -Emission von 25 % relativ zu dem $EEDI_{\text{Trendlinie}}$ (Basis) als möglich angesehen wird.

Demnach könnten für Neubauten die $EEDI_{\text{Trendlinien}}$ für eine mögliche Verringerung der CO_2 -Emission um 15 % und um 25 % in Verbindung mit der Gleichung (13) für Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 2,0 km/h und 8,0 km/h ausgedrückt werden. Die Anpassung der Schiffe der bestehenden Flotte ist unter Beachtung der umfangreichen Umbaumaßnahmen, siehe unter 6.1.1 vorstellbar.

Basis:

$$EEDI_{\text{MS Berg Trendlinie}} =$$

$$(\alpha_7 + \beta_5 \cdot V_{\text{str}} + \gamma_5 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\delta_3 + \varepsilon_2 \cdot V_{\text{str}} - \zeta_1 \cdot V_{\text{str}}^2 + \eta_1 \cdot V_{\text{str}}^3) \cdot \text{EXP}\left(\frac{dw}{-\theta_1}\right) \quad (13)$$

Basis -15 %:

$$EEDI_{\text{MS Berg Trendlinie}} = ((\alpha_7 + \beta_5 \cdot V_{\text{str}} + \gamma_5 \cdot V_{\text{str}}^2) + (\delta_3 + \varepsilon_2 \cdot V_{\text{str}} - \zeta_1 \cdot V_{\text{str}}^2 + \eta_1 \cdot V_{\text{str}}^3) \cdot \text{EXP}\left(\frac{dw}{-\theta_1}\right)) \cdot 0,85 \quad (27)$$

Basis -25 %:

$$EEDI_{MS\text{ BergTrendlinie}} = ((\alpha_7 + \beta_5 \cdot V_{str} + \gamma_5 \cdot V_{str}^2) + (\delta_3 + \varepsilon_2 \cdot V_{str} - \zeta_1 \cdot V_{str}^2 + \eta_1 \cdot V_{str}^3) \cdot EXP\left(\frac{dw}{-\theta_1}\right)) \cdot 0,75 \quad (28)$$

6.2.2 Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)

Für die Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe) konnten nur zwei Datenpunkte aus Großversuchsmessungen zum Vergleich mit den Modellversuchsergebnissen herangezogen werden. Eine Abstufung zur Verminderung der CO₂-Emission wird aufgrund der geringen Vergleichsmöglichkeit für die Fahrzeugklasse 2 nicht vorgeschlagen.

6.2.3 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)

Für die Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände) zeigt sich, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6,0 km/h die Verbände der bestehenden Flotte mindestens eine 25 % geringere CO₂-Emission relativ zu dem $EEDI_{Trendlinie}$ (Basis) haben können. Deshalb wird für Neubauten der Fahrzeugklasse 3 eine Abstufung der CO₂-Emission von 15 % und 25 % basierend auf der $EEDI_{Trendlinie}$, Gleichung (17) für Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 2,0 km/h und 6,0 km/h vorgeschlagen.

Basis:

$$EEDI_{SV\text{ BergTrendlinie}} = \frac{(\alpha_8 - \beta_8 \cdot V_{str} + \delta_6 \cdot V_{str}^2) + (\gamma_7 + \varepsilon_5 \cdot V_{str} + \zeta_3 \cdot V_{str}^2) \cdot EXP(dw/-\eta_3)}{EXP(dw/-\eta_3)} \quad (17)$$

Basis -15 %:

$$EEDI_{SV\text{ BergTrendlinie}} = \frac{(\alpha_8 - \beta_8 \cdot V_{str} + \delta_6 \cdot V_{str}^2) + (\gamma_7 + \varepsilon_5 \cdot V_{str} + \zeta_3 \cdot V_{str}^2) \cdot EXP(dw/-\eta_3)}{EXP(dw/-\eta_3)} \cdot 0,85 \quad (29)$$

Basis -25 %:

$$EEDI_{SV\text{ BergTrendlinie}} = \frac{(\alpha_8 - \beta_8 \cdot V_{str} + \delta_6 \cdot V_{str}^2) + (\gamma_7 + \varepsilon_5 \cdot V_{str} + \zeta_3 \cdot V_{str}^2) \cdot EXP(dw/-\eta_3)}{EXP(dw/-\eta_3)} \cdot 0,75 \quad (30)$$

6.2.4 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)

Für die Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe) konnten nur zwei Datenpunkte aus Großversuchsmessungen zum Vergleich mit den Modellversuchsergebnissen herangezogen werden. Eine Abstufung zur Verminderung der CO₂-Emission wird aufgrund der geringen Vergleichsmöglichkeit für die Fahrzeugklasse 4 nicht vorgeschlagen.

6.3 Stufenweise Bewertung zum fahrtgebietsabhängigen $EEDI_{Binnen}$, Zone 4

Die CO₂-Emission der Bestandsschiffe innerhalb der Zone 4 ist um etwa das 1,5 bis 3,5 fache niedriger als innerhalb der Zone 3. Es wird für Neubauten vorgeschlagen, nur eine Abstufung um 15 % vorzunehmen, bis umfangreiche Großversuche die Basis- $EEDI_{Kanal\ Trendlinien}$ bestätigt, bzw. angepasst haben.

6.3.1 Fahrzeugklasse 1 (Trockengutschiffe und Containerschiffe)

Basis: $EEDI_{MS \text{ Kanal Trendlinie}} = \alpha_{12} - \beta_{11} \cdot dw$ (20)

Basis -15 %: $EEDI_{MS \text{ Kanal Trendlinie}} = (\alpha_{12} - \beta_{11} \cdot dw) \cdot 0,85$ (31)

6.3.2 Fahrzeugklasse 2 (Tankschiffe)

Basis: $EEDI_{TMS \text{ Kanal Trendlinie}} = \alpha_{12} - \beta_{11} \cdot dw$ (20)

Basis -15 %: $EEDI_{TMS \text{ Kanal Trendlinie}} = (\alpha_{12} - \beta_{11} \cdot dw) \cdot 0,85$ (32)

6.3.3 Fahrzeugklasse 3 (Schubverbände)

Basis: $EEDI_{SV \text{ Kanal Trendlinie}} = \alpha_{13} - \beta_{12} \cdot dw$ (21)

Basis -15 %: $EEDI_{SV \text{ Kanal Trendlinie}} = (\alpha_{13} - \beta_{12} \cdot dw) \cdot 0,85$ (33)

6.3.4 Fahrzeugklasse 4 (Fahrgastschiffe)

Basis: $EEDI_{FGS \text{ Kanal Trendlinie}} = \alpha_{14} - \beta_{13} \cdot \Delta$ (22)

Basis -15 %: $EEDI_{FGS \text{ Kanal Trendlinie}} = ((\alpha_{14} - \beta_{13} \cdot \Delta) \cdot 0,85$ (34)

7 *EEOI* in der Binnenschifffahrt

7.1 Einfluss der Umgebungsbedingungen

Der Energiebedarf während des Betriebs von Binnenschiffen wird im Wesentlichen durch breiten- und tiefenmäßig einschränkende Fahrrinnen mit zeitlich veränderlicher Wasserführung und Strömungsgeschwindigkeiten beeinflusst. Gleiche Bedingungen für einen Transport an unterschiedlichen Tagen kommen selten vor, so dass ein einzelner Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch nicht oder nur schwer identifiziert werden kann.

7.2 Vorschlag für die Erfassung des *EEOI*

Zunächst wird vorgeschlagen, den gleichen Ansatz wie in der Seeschifffahrt aufzugreifen, siehe Gleichung (2). Die Seeschifffahrt ist durch den Einfluss von Wind und Wellen ähnlichen Schwierigkeiten ausgesetzt.

Es wird vorgeschlagen, dass für Binnenschiffe einzelne Teilstrecken eines Transportes oder einer Reise energetisch bewertet werden. Als Teilstrecken auf dem Rhein bieten sich die Strecken zwischen den Mündungen der schiffbaren Nebenflüsse oder der Kanäle an. Außerdem kann die Mosel, der Main oder der Neckar eine Teilstrecke sein. Im westdeutschen Kanalgebiet wäre die Verbindung vom Rhein nach Berlin oder Lauenburg ein mögliches Teilgebiet. Die Ems, die Weser, die Elbe und die deutsche Donau bieten ebenfalls mögliche Teilstrecken.

Die Eingangsdaten für einen *EEOI* in der Binnenschifffahrt werden in der Praxis für jedes Schiff schon weitestgehend erfasst. Zu Beginn und zum Ende eines Transportes wird der Gesamtverbrauch mittels Tankfüllstandsanzeigen ermittelt und mit den Bunkermengen abgeglichen. Die Informationen der jeweiligen Ladungsmengen werden und müssen an Bord mitgeführt werden.

Allerdings wird üblicherweise nicht die Füllstandsmenge des Kraftstoffes mit der Einfahrt in ein anderes Fahrtgebiet, beispielsweise die Einfahrt vom Rhein in den Main, erfasst und protokolliert. Auch die Wasserführung bzw. die zugehörigen Pegelstände werden in der Regel nicht mit den Angaben des Kraftstoffverbrauchs mitgeführt.

Die Zusammenführung dieser Daten macht es aber erst möglich, bei vergleichbaren Schiffs- und Fahrwasserbedingungen festzustellen, ob eine bestimmte nautische Strategie, ein veränderter Betriebsablauf, eine bauliche Veränderung des Schiffes oder die Wasserführung des Fahrwassers eine energetische Verbesserung oder Verschlechterung bewirkt hat. Um eine energetische Veränderung festzustellen, werden die bereits erhobenen Daten strukturiert, so dass vergleichbare Bedingungen gegenüber gestellt werden können.

Die Vorgehensweise bei der Bewertung der Energie-Effizienz im Betrieb des Schiffes könnte wie folgt aussehen:

An den jeweiligen Mündungs- oder Verbindungsstellen werden die Kraftstoffverbräuche ermittelt und entsprechend der Gleichung (2) bestimmt. Dabei wird die

Entfernung D in km eingesetzt. Der ggf. repräsentative Pegelstand einer Teilstrecke und die Berg- oder Talfahrt werden mitgeführt.

Der Kraftstoffverbrauch von Leerfahrten kann getrennt dokumentiert werden und wird innerhalb eines bestimmten Zeitfensters berücksichtigt.

Auf diese Weise kann ein streckenbezogener, pegelabhängiger *EEOI* ermittelt werden, der Vergleiche des Energiebedarfs zulässt. Die Machbarkeit dieser Methode ist abhängig davon, wie genau in der Praxis der Verbrauch über die Füllstandsanzeiger ermittelt werden kann. Danach richtet sich auch, wie lang eine Teilstrecke sein muss bzw. welche Verbrauchsdifferenzmengen mit ausreichender Genauigkeit ablesbar sind, um gute Verbrauchsergebnisse für den Streckenbereich zu erhalten. Bei regelmäßiger Dokumentation der Energieverbräuche in einer Datenbank können mittelfristig angemessene Vergleiche und damit Schlussfolgerungen gezogen werden.

Diese Methode zur Erfassung des CO_2 -Ausstosses pro Tragfähigkeit (Verdrängungsmasse) und Wegstrecke berücksichtigt den Gesamtverbrauch des Transportes in Abhängigkeit zum Fahrtgebiet. Zusätzliche Messtechnik wird, vorausgesetzt es sind Füllstandsanzeiger vorhanden, nicht benötigt. Diese Methode kann somit mit vorhandenen Bordmitteln durchgeführt werden und eignet sich deshalb auch für die energetische Bewertung der Bestandsflotte. Es sollten relativ lange Teststrecken ausgewählt werden, die von den jeweiligen Fahrzeugen regelmäßig befahren werden.

Die Abb. 9 zeigt ein Beispiel in Form einer Excel-Tabelle, wie ein *EEOI* ermittelt und dokumentiert werden könnte.

Beispiel:		EEOI in der Binnenschifffahrt																
	Strecke	III	IV	V	VI	VII	VIII	IIIa	IVa	IVb	Va	Via	A	B	C	D		
	Teilstrecken	Spysck-Koblenz	Koblenz-Mainz	Mainz-Mannheim	Mannheim-Iffezheim	Iffezheim-Kembs	Kembs-Rheinfelden	Mosel	Main	MDK	Donau	Neckar	WDK, RHK, DEK, MLK, ESK, EHK,	Ems	Weser	Elbe	Gesamt	
	Streckenlänge	266 km	93 km	74 km	91 km	160 km	30 km											
	Pegelstandort	Köln	Kaub	Mannheim	Maxau	Rheinhalle												
1	Reise	Duisburg nach Bamberg						Ladungsmenge	2000		t							
	Pegelstand [cm]	314	209															
	Entfernung [km]	189	93						387								669	
	Verbrauch [l]	3732	2542						5290								11564	
	EEOI_i [gCO ₂ /tkm]	26.7	37.0						18.5								23.4	
	Leerreise	Bamberg nach Regensburg																
	Verbrauch [l]																	1400
2	Reise	Regensburg nach Berlin						Ladungsmenge	1500		t							
	Pegelstand	305	199															
	Entfernung [km]	282							378	204			587				1451	
	Verbrauch [l]	1300							3360	1896			5933				12489	
	EEOI_i [gCO ₂ /tkm]	8.3							16.1	16.8			18.3				15.5	
	Leerreise	keine																
	Verbrauch [l]																	
3	Reise	Berlin nach Duisburg						Ladungsmenge	1800		t							
	Pegelstand																	
	Entfernung [km]																	587
	Verbrauch [l]																	6215
	EEOI_i [gCO ₂ /tkm]																	15.9
	Leerreise	keine																
	Verbrauch [l]																	
4	Reise	Duisburg nach Würth						Ladungsmenge	2200		t							
	Pegelstand	325	220	255	449													
	Entfernung [km]	189	93	74	59												415	
	Verbrauch [l]	4050	2750	1800	1550												10150	
	EEOI_i [gCO ₂ /tkm]	26.4	36.4	30.0	32.4												30.1	
	Leerreise	keine																
	Verbrauch [l]																	
								Ladungsmenge t		7500								
								Entfernung [km]		3121								
								Verbrauch [l]		41817								
								EEOI_i [gCO ₂ /tkm]		19.25								

Abb. 9: Beispielhaftes Auswertungslatt für die Ermittlung eines EEOI in der Binnenschifffahrt