

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1 von 1, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF-Vorhaben-Nummer 16276 N**

***Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Abschätzung der
Energieeinsparungspotenziale von Binnenschiffen***

(Bewilligungszeitraum: 01.12.2009 - 31.08.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Schiffstechnik

Duisburg, 20.12.2012

Ort, Datum

Dipl.-Ing. Th. Guesnet

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems

**Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Abschätzung
der Energieeinsparungspotenziale von Binnenschiffen**

**Bericht 2076
Dezember 2012**

Inhalt

Zusammenfassung	3
1. Veranlassung	4
2. Aufgabenstellung	5
3. Aufbereitung der Datenbasis	6
3.1 Datenergänzung	6
3.2 Datengruppierung	8
3.3 Aufbereitung mit DARWIN	8
3.3.1 Interpolation	9
3.3.2 Approximation	10
3.4 Datenbasis	10
4. Entwicklung eines Bewertungsverfahrens	11
4.1 Bestimmung der relevanten Parameter	13
4.2 Auswertungsverfahren	27
4.2.1 Messeinrichtung an Bord	27
4.2.2 Datenaufbereitung	30
4.2.3 Vergleich mit Referenzdaten	31
5. Probelauf und Kalibrierung	33
6. Diskussion und Ausblick	36
7. Ergebnistransfer	38
7.1 Nutzen für KMU	38
7.2 Veröffentlichungen	38
7.3 Schutzrechte	38
7.4 Transferkonzept	39
8. Arbeitsanleitungen	40
8.1 Phase 1	40
8.2 Phase 2	40
Literatur	42

Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsvorhabens konnte ein Verfahren zur energetischen Beurteilung von Binnenschiffen erarbeitet werden.

Die Grundlage für das Verfahren ist die Kenntnis des aktuellen Entwicklungsstandes der Schiffsformgestaltung und der Vortriebstechnik. Hierzu wurde der Datenbestand aller Modellversuche des DST (vormals VBD) herangezogen und nach dem Stand der Technik gefiltert. Fehlende Daten von Fahrzeugen wurden durch ergänzende Modellversuche ermittelt. Die parametrisierte Datenbasis wurde mit einem Interpolationsverfahren (DARWIN) aufbereitet, so dass für viele Schiffstypen Referenzdaten für einen energetischen Vergleich zur Verfügung stehen.

Die Vielzahl der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf der in Form und Ausrüstung unterschiedlichen Binnenschiffe im Einsatz in Fahrtgebieten mit unterschiedlichen Wassertiefen, Fahrwasserquerschnitten und Strömungen führte zu einem 2-phasigen Verfahrensablauf. Hintergrund sind die relativ hohen Kosten, die bei einer umfassenden Energiebewertung für die Unternehmen entstehen. Die ausgearbeitete Vorgehensweise ermöglicht in der 1. Phase eine kostenlose Bewertung des Energieeinsparpotenzials mit eingeschränkten Randbedingungen.

Ergebnisabhängig folgt die 2. Phase mit externen Beratern und der genauen Überprüfung des Leistungsbedarfs mit detaillierter Analyse des Binnenschiffes in seinem Einsatzgebiet. Dazu wurde ein kompaktes Messequipment entwickelt, das auf dem Schiff installiert wird und autark über einen Zeitraum von etwa 6 Wochen die relevanten Parameter erfasst und aufzeichnet. Allerdings muss die Besatzung alle 5 Tage einen einfachen Batteriewechsel vornehmen. Die Daten werden anschließend ausgewertet und den bereitgestellten Referenzdaten gegenübergestellt, um das Energieeinsparpotenzial aufzuzeigen. Diese relativ kostenintensive Untersuchung zeigt im Ergebnis den Modernisierungsgrad und mit welchen Umbaumaßnahmen das Schiff energetisch günstiger in seinem Einsatzgebiet eingesetzt werden kann.

Mit diesem Verfahrensablauf konnte das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht werden.

Das IGF-Vorhaben Nr. 16276 N der Forschungsvereinigung Schiffstechnik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

1. Veranlassung

Innerhalb der Schiffsbetriebskosten nehmen die Treibstoffkosten neben den Finanzierungs-, Personal- und Vorhaltungskosten eine zentrale Position ein. In den vergangenen 10 Jahren sind die Kosten für die Treibstoffe um mehr als 50 % in der Binnenschifffahrt gestiegen. Dieser Trend wird sich in der Zukunft fortsetzen und verstärken. Weiterhin ist ein politisches Ziel, den Treibstoffverbrauch zu senken, um den Schadstoffausstoß zu reduzieren. Deshalb ist es erforderlich, den Energiebedarf pro Tonne oder pro Tonnenkilometer für den Schiffstransport schiffsspezifisch und in Abhängigkeit zu dem Einsatzgebiet festzustellen. In der Regel wissen die Schifffahrtstreibenden im Vergleich zu den Wettbewerbern, ob sie ein schnelles oder langsames Schiff einsetzen, aber ob sie energetisch günstig fahren, erschließt sich ihnen nicht. Nahezu jedes Schiff ist im Hinblick auf die Form, die Antriebsanlage, die Antriebsleistung, das Eigengewicht und die Ruderanlage individuell gestaltet. Ein Hilfsmittel, das den Treibstoffverbrauch zum Beispiel in Abhängigkeit zur Tragfähigkeit, zur Geschwindigkeit und zur Antriebsleistung vergleichend aufzeigt, könnte eine Bewertung des eigenen Schiffes möglich machen, um Investitionen zur Treibstoffreduktion kalkulierbar zu machen. Eine Begutachtung des Schiffes im Hinblick auf mögliche bauliche Veränderungen, um energetischer betrieben werden zu können, ist relativ kostenintensiv und der mögliche Erfolg einer Umbaumaßnahme wird nicht garantiert.

In den letzten Jahren konnte der spezifische Treibstoffverbrauch deutlich gesenkt werden. Dies konnte durch Weiterentwicklungen der Schiffsformen, der Antriebsorgane (Propeller, Düse), der Manövrieranlagen und der Antriebsmotoren erzielt werden. Die heute eingesetzte Binnenschiffsflotte hat ein relativ hohes Durchschnittsalter, aber das technische Schiffsalter, das innerhalb des AIF-Forschungsvorhabens [Lit.1] auf sicherheitsrelevante Aspekte bewertet wurde, ist im Hinblick auf den energetischen Stand oder allgemein dem technischen Stand sehr verschieden.

Die Antriebsmotoren der Schiffe müssen aufgrund der begrenzten Laufzeit im Laufe der Einsatzzeit des Schiffes erneuert werden, so dass moderne energieeffizientere Antriebstechniken, wie beispielsweise computergestützte Motorenregelungen, installiert werden. Dagegen werden Umbaumaßnahmen an der Schiffsform, aufgrund der hohen Investitionskosten selten durchgeführt, weil der energetische Nutzen für den Schifffahrtstreibenden vor der Investition nicht kalkulierbar ist. Somit setzt die bestehende Flotte die Vorteile der aktuellen Schiffsformenentwicklungen [Lit. 2 bis 7] nicht ein und vorhandenes Energieeinsparpotenzial bleibt ungenutzt.

2. Aufgabenstellung

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhaben besteht darin, ein Verfahren zu erarbeiten, um damit im Vorfeld zu einer Investition oder zur Beurteilung des Modernisierungsgrades des eigenen Schiffes, ein mögliches Energieeinsparpotenzial – gemessen an dem Stand der Technik – abschätzen zu können. Abhängig von dem Potenzial kann dann entschieden werden, ob eine kostenintensive Energieberatung durchgeführt wird, um dann die notwendigen Modernisierungsschritte und deren Amortisation aufzuzeigen

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren aus den schiffs- und fahrwasserseitigen Parametern wird ein 2-phasiger Lösungsweg angestrebt.

1. Phase
Energieeinsparpotenzial mit einheitlichen eingeschränkten Randbedingungen, aber kostengünstiger Abschätzung ohne externe Berater.
2. Phase
Genau Überprüfung des Leistungsbedarfs mit detaillierter Analyse, bei welchem Fahrzustand welcher Verbesserungsbedarf besteht. Die Durchführung erfolgt mit externem Berater.

In der 1. Phase soll frühzeitig das Energieeinsparpotenzial des eigenen Schiffes im Vergleich zu realisierten Schiffen aufgezeigt werden. Die Durchführung erfolgt mit bord-eigenen Mitteln und mit Web-Unterstützung. Das Bewertungsschema basiert auf der vorhandenen Datenbasis vorliegender Leistungs-Geschwindigkeitsprofile im mittleren Leistungsniveau der Schiffe und auf tiefem Fahrwasser (aus Großversuchsergebnissen). Üblicherweise werden die manövrier- und fahrtechnischen Eigenschaften der Schiffe beispielsweise für das Rheinattest auf tiefem Fahrwasser durchgeführt, so dass bei eingeschränkten Randbedingungen auch ein mögliches Energieeinsparpotenzial aufgezeigt werden kann. Je nach Ergebnis der 1. Phase erfolgt die 2. Phase.

In der 2. Phase basiert das Verfahren auf einem Bewertungsschema der vorhandenen Datenbasis in Form vorliegender Leistungs-Geschwindigkeitsprofile. Die Schiffe werden nach relevanten schiffsbezogenen und topographischen Einflussgrößen analysiert und klassifiziert. Zu den schiffsrelevanten Einflussgrößen zählen die Rumpfform (Hauptabmessungen, Hinter- und Vorschiffsform), die Art der Ruderanlage, die Größe und Anzahl der Schrauben und das Eigengewicht des Schiffskaskos. Die Wassertiefe, die Strömungsgeschwindigkeit und der Fluss- oder Kanalquerschnitt sind bei der Bewertung die topographischen Einflussgrößen. Die Interaktion der Einflussgrößen spiegelt sich in dem Bewertungsschema wieder und ermöglicht den konkreten Vergleich mit einem Schiff aus der Flotte. Dieser Vergleich erfolgt in der Praxis und die Handhabung wird in einer Arbeitsanleitung formuliert.

Mit dieser Vorgehensweise wird der Einstieg in eine Energieberatung erleichtert, weil schon das kostengünstige Verfahren nach Phase 1 Aufschluss über ein mögliches allgemeines Energieeinsparpotenzial gibt. Das spezifische Energieeinsparpotenzial wird mit Hilfe von externen Beratern mit der nachfolgenden Phase ermittelt.

3. Aufbereitung der Datenbasis

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des zu untersuchenden Schiffes treffen zu können, muss der Vergleichsmaßstab definiert werden. Dies geschieht aus der Datenbasis aller Modellversuche, die bisher im DST (vormals VBD) durchgeführt worden sind.

Die vorhandenen Modellversuchsdaten werden in Stufen aufbereitet. Ziel dieser Vorarbeit ist es, für jedes Schiff eine funktionale Beschreibung

$$P_D = f(V_{dW}, T, h)$$

zu finden.

Dazu werden zuallererst die Rohdaten nach Schiffstypen/-klassen gruppiert und innerhalb der Gruppierungen alle Daten ausgefiltert, die nicht dem Stand der Technik entsprechen.

Danach werden für jeden Schiffstyp die Versuchsdaten, die aus verschiedenen Modellversuchen und verschiedenen Schiffsmoellen stammen können, mit Hilfe des Interpolationsverfahrens DARWIN (Datenreduktions- und Wichtungsinterpolation) aufbereitet und in den diskreten, dreidimensionalen Werteraum

$$P_{D,ijk}(V_{dW,i}, T_j, h_k)$$

überführt.

Innerhalb dieses Raumes kann dann später bei der Auswertung für beliebige V_{dW} , T und h linear interpoliert werden.

3.1 Datenergänzung

Eine Prüfung der vorhandenen Daten zeigte, dass der Datenumfang zur Abbildung von Schubverbänden im Bereich von 1-spurig-2-gliedrigen Schubverbänden nicht ausreichend ist. Diese Schubverbandsformationen werden heute vermehrt eingesetzt, so dass ergänzende Modellversuche zur Datenergänzung durchgeführt wurden.

Es wurden mit Standardschubleichtern des Typs „Eilb“ Widerstandsversuche auf 2 Wassertiefen mit 4 Tiefgängen und auf einer Wassertiefe mit 3 Tiefgängen durchgeführt. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Diagrammform dargestellt, Abbildungen 1 bis 3.

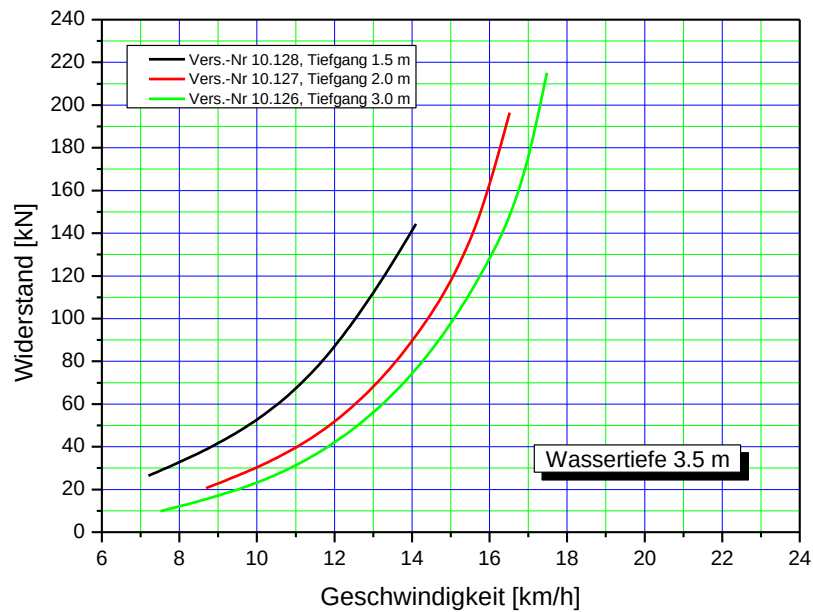


Abbildung 1: Wassertiefe 3,5 m

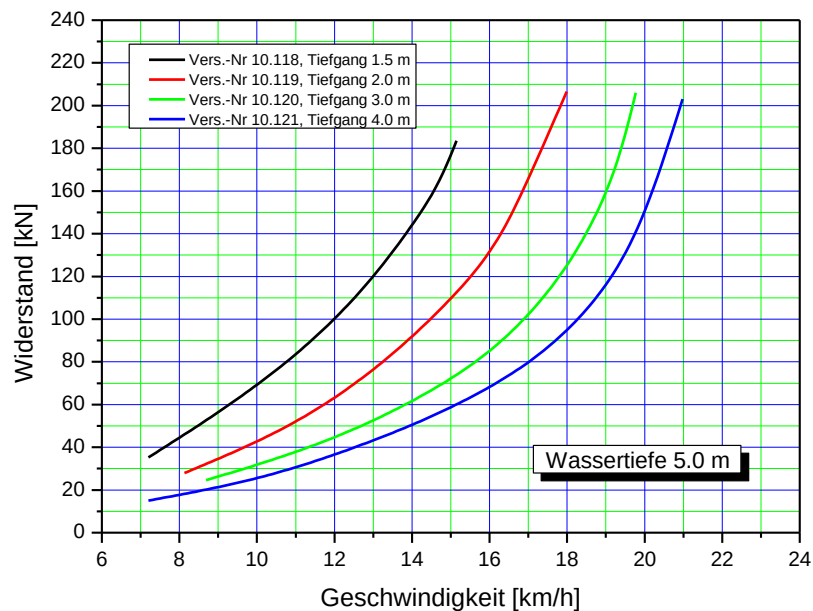


Abbildung 2: Wassertiefe 5,0 m

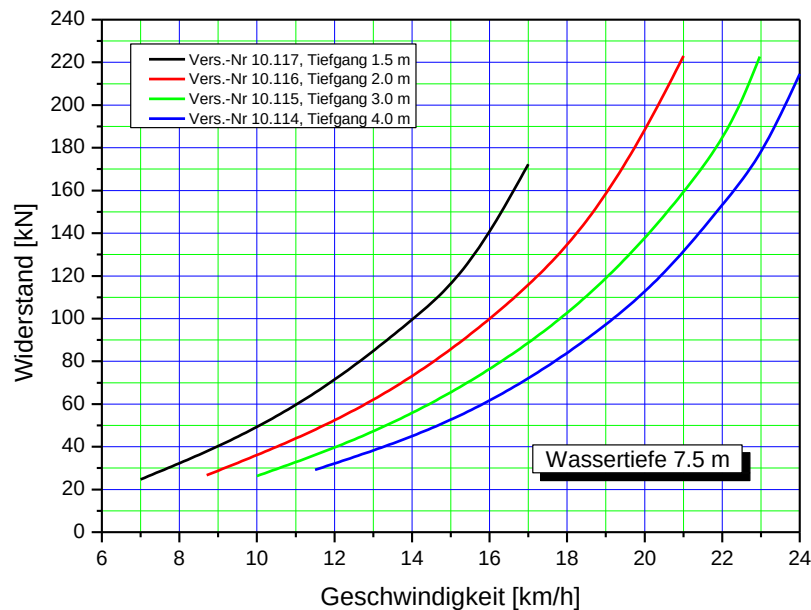


Abbildung 3: Wassertiefe 7,5 m

Die vollständigen Ergebnisse wurden in die vorhandene Datenbasis übernommen.

3.2 Datengruppierung

Die Rohdaten aller Modellversuche werden nach folgenden Kriterien gruppiert:

- Schiffstyp (Güterschiff, Schubverband usw.)
- Hauptabmessungen
- Anzahl Propeller

Jede Gruppierung von Daten ist ein Datensatz, der separat weiter verarbeitet wird. Für die spätere Beurteilung eines Schiffes wird der Datensatz ausgewählt, dessen Schiffsparameter am besten passen.

3.3 Aufbereitung mit DARWIN

Das Verfahren wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *Sicherbin* [Lit. 8] am DST entwickelt. Es dient dazu, in einer Datenmenge von n -Tupeln zu interpolieren.

Hier besteht die Datenmenge aus Quadrupeln $[P_D, V_{dW}, T, h]^T$ mit dem Parametervektor $\vec{p} = [V_{dW}, T, h]^T$ und der Zielgröße P_D .

Im ersten Schritt werden Parameter normalisiert:

$$\vec{p}' = \left[\frac{V_{dW}}{V_{dW,max}}, \frac{T}{T_{max}}, \frac{h}{h_{max}} \right]^T = [V'_{dW}, T', h']^T$$

Da hier alle Parameter stets positiv sind, gilt für die normierte Parametervektoren dann

$$|\vec{p}'| \leq 1$$

Theoretisch könnte für jede Komponente von $\vec{p}'$ auch eine andere Normierung vorgenommen werden, um eine andere Gewichtung der Komponente innerhalb des Parametervektors bei der Interpolation zu erzielen. Darauf wird hier aber verzichtet.

Es ergibt sich dann eine Datenmenge $\mathbf{Q} = \{[\vec{p}'_n, P_{D,n}]^T\}$ der Mächtigkeit N . Aus dieser Datenmenge werden Zieldaten für diskrete Stützstellen $\vec{p}'_{i,j,k} = [V'_{dW,i}, T'_j, h'_k]^T$ interpoliert. In diesem Projekt sind genügend Rohdaten vorhanden, so dass keine Extrapolationen nötig werden.

3.3.1 Interpolation

Für die zu interpolierenden Parameter $\vec{p}'_0$ werden für alle Punkte der Datenmenge die euklidischen Abstände

$$\omega_n = |\vec{p}'_n - \vec{p}'_0| = \sqrt{(V'_{dW,n} - V'_{0,n})^2 + (T'_{dW,n} - T'_{0,n})^2 + (h'_{dW,n} - h'_{0,n})^2}$$

berechnet. Von allen Datenpunkten werden die g nächsten Punkte n_γ verwendet mit

$$\omega_{n_\gamma} \leq \omega_{n_\gamma+1}, \gamma = 1 \dots g$$

Die Zielgröße P_D ist dann

$$P_D = \frac{\sum_{\gamma=1}^g P_D \frac{1}{\omega_{n_\gamma}}}{\sum_{\gamma=1}^g \frac{1}{\omega_{n_\gamma}}}$$

Als Ergebnis der Interpolation liegt ein Datenraster $P_{D,ijk}(V_{dW,i}, T_j, h_k)$ vor.

3.3.2 Approximation

Es zeigt sich allerdings, dass das Datenraster aufgrund der Tatsache, dass die Daten aus verschiedenen Modelluntersuchungen zusammengeführt wurden, bei einigen Schiffstypen geringe Unstetigkeiten aufweisen. Um diese auszugleichen, wurde eine Spline-Approximation $\tilde{P}_{D,ijk}(V_{dW,i}, T_j, h_k)$ gebildet:

$$\sum_{i,j,k} (\tilde{P}_{D,ijk}(V_{dW,i}, T_j, h_k) - P_{D,ijk}(V_{dW,i}, T_j, h_k))^2 = \min$$

3.4 Datenbasis

Mit dem oben beschriebenen Verfahren wurden bereits die Daten für folgende Schiffstypen aufbereitet:

Schiffstyp	Länge m	Breite m	Propeller	Düsen
GMS 110	110	11,4	2	ja
GMS 135	135	11,4	2	ja
Gustav Koenigs	67	8,2	1	nein
Johann Welker	80	9,5	1	nein
Koppverband	186	11,4	2	ja
Jowi	135	16,8	2	ja
Schubboot mit 4 Eil-Leichtern	193	22,8	2	ja

Diese Schiffstypen decken einen großen Teil der aktiv operierenden Binnenschiffsflotte – zumindest im Bereich des Güterverkehrs – ab.

Für den jeweiligen Schiffstyp stehen die Daten für den gesamten jeweils einsetzbaren Tiefgangsbereich zur Verfügung. Die Wassertiefe deckt den Bereich zwischen 1,6 m und 10 m ab.

Beim konkreten Vergleich müssen Länge und Breite nicht exakt übereinstimmen, da das Vergleichsschiff bei der Berechnung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ letztendlich skaliert wird. Die Rumpfformen und die Propulsionsanlage sollten allerdings ähnlich sein.

Die Beurteilung von Schubverbänden gestaltet sich grundsätzlich schwierig, da es sich hierbei nicht um ein Schiff handelt. Die einzelnen Rümpfe des Schubverbands erfahren eine deutliche hydrodynamische Wechselwirkung. Für einen genauen Vergleich des zu untersuchenden Verbands mit dem Stand der Technik kann dann kaum auf eine Konfiguration aus der Datenbasis zu rückgegriffen werden, sondern es müssten individuelle Modelluntersuchungen erfolgen.

4. Entwicklung eines Bewertungsverfahrens

Im Weiteren ist ein allgemein anwendbares Verfahren zu entwickeln, welches einen Vergleich realer Schiffe mit den zuvor ermittelten Referenzwerten ermöglicht. Neben den bereits genannten Klassifizierungen, sind vor allem die wechselnden Wassertiefen und Tiefgänge angemessen zu berücksichtigen. Nachfolgend wird ein Ausblick auf andere in der Praxis durchgeführte Bewertungsverfahren gegeben.

Energiebewertung von Gebäuden

Für Gebäude sind seit 2009 Energieausweise eingeführt und vorgeschrieben worden, um den Energiebedarf (kWh/m²) einer Wohnung oder eines Hauses unter Berücksichtigung der Klimazone von Käufern oder Mietern qualitativ bewerten zu können. Der Vergleich erfolgt beispielsweise mit einem hinterlegten Bandtacho, auf dem die Verbrauchswerte klassifiziert und mit tatsächlichen Verbrauchswerten des Hauses gegenüber gestellt werden, siehe Abbildung 4.

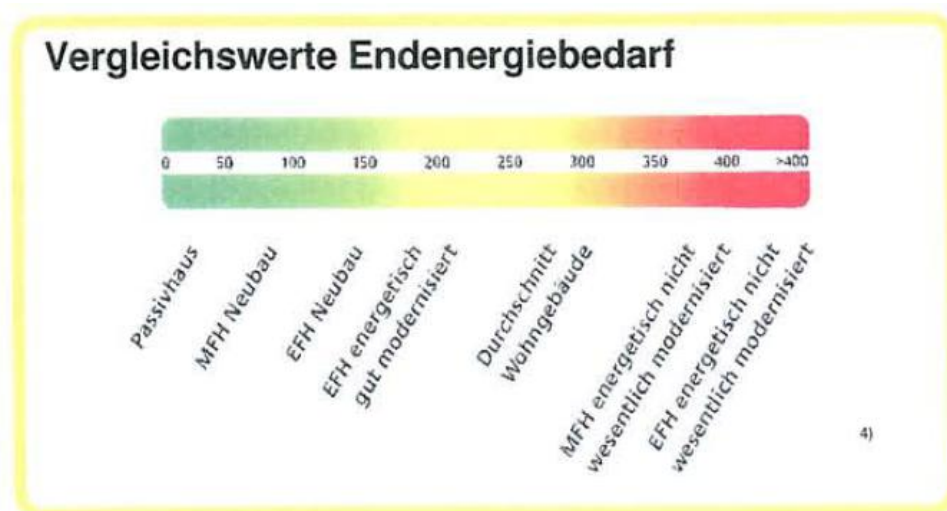


Abbildung 4: Bandtacho Gebäude-Endenergiebedarf

Energiebewertung von PKWs und LKWs anhand der CO₂-Emission

PKWs werden innerhalb ihrer Klasseneinteilung energetisch bzw. anhand ihrer CO₂-Emission pro km bewertet. Ein Bezug zu ihrem Eigengewicht oder der beförderten Personenanzahl und/oder des Transportgewichtes wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Bewertung der LKWs erfolgt über die Ermittlung der abgegebenen Arbeit des Motors (Schadstoffe pro Kilowattstunde). Auch hier fehlt der Bezug zum Transportgewicht.

Energiebewertung von Seeschiffen mittels eines Energieeffizienz-Kennwertes

In der Seeschifffahrt wird ab dem 01.07.2013 für Schiffsneubauten ein Energieeffizienz-Kennwert (EEDI) eingeführt. Dieser Kennwert berücksichtigt die Tragfähigkeit, die Schiffsgeschwindigkeit und den Treibstoffverbrauch. Im Ergebnis wird die CO₂-Emission pro Tonne und Seemeile angegeben. Indirekt wird auch die Schiffsform und das Schiffseigengewicht bewertet, so dass auch in der Binnenschifffahrt eine solche Bewertung sinnvoll erscheint.

Der Index EEDI wird wie folgt berechnet: $EEDI = C_F \times SFC \times P / (Capacity \times V_{ref})$

C_F	dimensionsloser Umrechnungsfaktor zwischen dem Treibstoffverbrauch und der CO ₂ -Emission (C _F = 3.1)
SFC	spezifischer Treibstoffverbrauch der Antriebsmaschine in g/kWh, (etwa 230g/kWh)
P	Antriebsleistung in kW bei 75 % der MCR, zuzüglich der Leistung der im Schiffsbetrieb verwendeten Aggregate.
V_{ref}	Schiffsgeschwindigkeit, bei • tiefem Wasser • größtem Tiefgang • Maschinenleistung bei 75 % • ohne Wind- und Seegangseinfluss • Einheiten in Knoten (nautische Seemeile pro Stunde)

Capacity Tragfähigkeit des Schiffes in Tonnen

Der EEDI soll zunächst für Bulker und Containerschiffe eingeführt werden, für Tanker, Kreuzfahrtschiffe, Schlepper und sonstige Fahrzeuge wird noch an Umrechnungsfaktoren gearbeitet.

Energiebewertung von Binnenschiffen

Binnenschiffe werden im Hinblick auf ihre Energieeffizienz heute untereinander noch nicht bewertet. Natürlich führen Reedereien und Partikuliere ein Treibstoffverbrauchsnachweis und können pro transportierte Ladungsmenge den Verbrauch der Schiffe untereinander vergleichen. Eine Gegenüberstellung der Schiffe mit der gesamten Flotte unter Einhaltung wichtiger bestimmender Randbedingungen, wie Wassertiefe, Strömung, kann aber nicht erfolgen.

4.1 Bestimmung der relevanten Parameter

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll eine Bewertungsmöglichkeit für die einzelnen Schifffahrtstreibenden erarbeiten, um ihr Schiff einordnen zu können, ob es energetisch gut oder schlecht transportiert. Der Schifffahrtstreibende soll relativ einfach abschätzen können, ob ein ausreichendes Verbesserungspotenzial besteht, um Investitionen in eine Optimierung zu tätigen.

Dazu wird die Erarbeitung eines $EEDI_{\text{Binnen}}$, vergleichbar wie in der Seeschifffahrt, als zielführend erachtet. Für die Binnenschifffahrt sind ebenso wie in der Seeschifffahrt Korrekturen und Ergänzungen notwendig. Insbesondere die Fahrwasserparameter und die Einsatzbedingungen müssen erfasst werden. Weiterhin können die verschiedenen Schiffstypen, wie Massengutschiffe, Tankschiffe, Einzelfahrer und Schubverbände nicht direkt gleich behandelt werden. Beispielsweise haben Tankschiffe aufgrund ihrer Ausrüstung (Tankanlage, eigene Lade- und Löscheinrichtung) ein höheres Schiffseigengewicht als Massengut- oder Containerschiffe und somit bei gleichem Tiefgang eine geringere Tragfähigkeit. Dies führt dazu, dass ein vergleichsweise höherer Energieverbrauch pro Ladungstonne notwendig ist.

Die Geschwindigkeiten werden auf Binnenwasserstraßen in Kilometer pro Stunde gemessen, so dass auch diese Geschwindigkeitsangabe für die Bestimmung eines $EEDI_{\text{Binnen}}$ zur Bewertung des Energiepotenzials des Schiffe berücksichtigt werden sollte. Nachfolgend werden die möglichen Eingangsdaten aufgeführt, Tabelle 1.

Schiffslänge	L	m
Schiffsbreite	B	m
Schiffstiefgang	T	m
Tragfähigkeit	dw	t
Antriebsleistung	P	kW
Leistung der Nebenaggregate	P_{Betrieb}	kW
Wassertiefe	h	m
spezifischer Treibstoffverbrauch	SFC	g/(kWh)
Umrechnungsfaktor Treibstoff in CO ₂ -Emission	Cf	-
Geschwindigkeit über Grund	V_{üG}	km/h
$Cf \times SFC \times (P + P_{\text{Betrieb}}) / (dw \times V_{\text{üG}})$	$EEDI_{\text{Binnen}}$	g CO ₂ / tkm

Tabelle 1: Eingangsdaten $EEDI_{\text{Binnen}}$

Fahrt bei unterschiedlichen Antriebsleistungen

Die Fahrzeuge der Binnenschifffahrt setzen entsprechend der Wasserstraße und der Fahrtrichtung (zu Berg/zu Tal) unterschiedliche Antriebsleistungen ein. Aus den Propulsionsergebnissen eines abgeschlossenen Vorhabens von Großversuchsmessungen werden die $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Kennwerte für unterschiedliche Leistungsbereiche bei einer konstanten Wassertiefe angegeben, Tabelle 2.

Nennleistung	kW	1320	1320	1320	1320
Anteil Nennleistung	%	10	50	75	90
L	m	110	110	110	110
B	m	10.5	10.5	10.5	10.5
T	m	3.18	3.18	3.18	3.18
dw	t	2436	2436	2436	2436
P	kW	132	660	990	1188
P_{Betrieb}	kW	7	7	7	7
h	m	9.5	9.5	9.5	9.5
SFC	g/(kWh)	270	233	218	213
Cf	-	3.1	3.1	3.1	3.1
V_{üG}	km/h	9.4	15.9	17.6	18.4
EEDI_{Binnen}	g CO ₂ /tkm	5.11	12.45	15.75	17.58

Tabelle 2: Nennleistungsabhängigkeit des $EEDI_{\text{Binnen}}$

Die Kennwerte sind erwartungsgemäß von der mit 10 % kleinsten Nennleistung bis zu 90 % der Nennleistung ansteigend.

Fahrt bei unterschiedlichen Wassertiefen

Die Relationen bei gleichem Nennleistungsanteil und unterschiedlichen Wassertiefen zeigt die nachfolgende Tabelle 3.

Nennleistung	kW	1320	1320	1320
Anteil Nennleistung	%	75	75	75
L	m	110	110	110
B	m	10.5	10.5	10.5
T	m	3.18	3.18	3.18
dw	t	2436	2436	2436
P	kW	990	990	990
P_{Betrieb}	kW	7	7	7
h	m	5	7.5	10
SFC	g/(kWh)	218	218	218
Cf	-	3.1	3.1	3.1
V_{üG}	km/h	14.70	16.60	17.70
EEDI_{Binnen}	g CO2/tkm	18.86	16.70	15.66

Tabelle 3: Wassertiefenabhängigkeit des EEDI_{Binnen}

Die EEDI_{Binnen}-Kennwerte werden mit abnehmender Wassertiefe größer.

Fahrt auf Flüssen

Bei der Fahrt auf Flüssen fahren die Binnenschiffe in der Berg- und Talfahrt auf einem Fluss nicht mit gleicher Antriebsleistung. In der Bergfahrt werden und müssen je nach Tiefgang, Fahrwasserquerschnitt, Wassertiefe, Strömung und schiffahrtspolizeilicher Vorschriften (Mindestgeschwindigkeiten) etwa 50 bis 90 % der vorhandenen Antriebsleistung eingesetzt werden. Dagegen sind in der Talfahrt Antriebsleistungen von etwa 10 %, zur Sicherstellung der Manövrierfähigkeit bis zu 50 % der vorhandenen Antriebsleistung üblich, so dass erhebliche Differenzen bei der energetischen Bewertung des Schiffes und gegenüber den anderen Schiffen vorhanden sind. Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt den Vergleich zwischen Berg- und Talfahrt bei den heute üblichen Antriebsleistungen.

Strömung	8 km/h	Bergfahrt	Talfahrt
Nennleistung	kW	1320	1320
Anteil Nennleistung	%	90	10
L	m	110	110
B	m	10.5	10.5
T	m	3.18	3.18
dw	t	2436	2436
P	kW	1188	132
P _{Betrieb}	kW	7	7
h	m	9.5	9.5
SFC	g/(kWh)	213	270
Cf	-	3.1	3.1
V _{üG}	km/h	10.4	17.4
EEDI _{Binnen}	g CO ₂ /tkm	31.10	2.75

Tabelle 4: EEDI_{Binnen} bei Berg- und Talfahrt

Bei der Fahrt auf Flüssen in der Berg- und Talfahrt liegen die EEDI_{Binnen}-Kennwerte zwischen 2,75 und 31,10 g CO₂/tkm. In der Bergfahrt können die Kennwerte bei geringeren Wassertiefen als 9,5 m noch einen größeren Wert annehmen.

Fahrt in Kanälen

Die hydrodynamischen Einflussfaktoren bei der Fahrt in Kanälen werden, abgesehen von der Strömung, noch durch die seitliche Einschränkung des Fahrwassers vermehrt. Weiterhin muss die Schiffsbreite bei einer Energieverbrauchsbewertung hinreichend berücksichtigt werden. Die Spannweite des EEDI_{Binnen} beträgt in den Kanälen bei Wassertiefen zwischen 3,5 m und 4,0 m und Kanalquerschnitten zwischen 100 m² und 276 m² etwa 6 bis 40 g CO₂/tkm. Bei diesen Kennwerten liegen die Schiffsbreiten der untersuchten Fahrzeuge zwischen 8,2 und 9,5 m und der Leistungseinsatz der Antriebsanlage zwischen 10 % und 40 % der Maximalleistung. Bei größeren Schiffsbreiten als 9,5 m können die Kennwerte bei praxisnahe Leistungseinsatz noch höher als 40 g CO₂/tkm liegen.

Fahrt mit unterschiedlichem technischen Stand der Antriebsmotoren

Der technische Stand der Antriebsmotoren wurde mit der elektronisch geregelten Kraftstoffzuführung deutlich verbessert. Die Einführung erfolgte in der Binnenschiffahrt etwa um 1990. Insbesondere konnte der spezifische Verbrauch im Teillastbereich um rund 10 % bis 20 % verbessert werden. Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt einen Vergleich des $EEDI_{\text{Binnen}}$ bei unterschiedlichem spezifischen Verbrauch des Motors im Teillastbereich.

Alter des Motors	etwa	nach 1990	vor 1990	nach 1990	vor 1990
Nennleistung	kW	1320	1320	1320	1320
Anteil Nennleistung	%	10	10	50	50
L	m	110	110	110	110
B	m	10.5	10.5	10.5	10.5
T	m	3.18	3.18	3.18	3.18
dw	t	2436	2436	2436	2436
P	kW	132	132	660	660
P_{Betrieb}	kW	7	7	7	7
h	m	9.5	9.5	9.5	9.5
SFC	g/(kWh)	248	297	211	232
Cf	-	3.1	3.1	3.1	3.1
V_{üG}	km/h	9.4	9.4	15.9	15.9
EEDI_{Binnen}	g CO ₂ /tkm	4.69	5.62	11.25	12.37

Alter des Motors	etwa	nach 1990	vor 1990	nach 1990	vor 1990
Nennleistung	kW	1320	1320	1320	1320
Anteil Nennleistung	%	75	75	90	90
L	m	110	110	110	110
B	m	10.5	10.5	10.5	10.5
T	m	3.18	3.18	3.18	3.18
dw	t	2436	2436	2436	2436
P	kW	990	990	1188	1188
P_{Betrieb}	kW	7	7	7	7
h	m	9.5	9.5	9.5	9.5
SFC	g/(kWh)	204	222	202	217
Cf	-	3.1	3.1	3.1	3.1
V_{üG}	km/h	17.6	17.6	18.4	18.4
EEDI_{Binnen}	g CO ₂ /tkm	14.68	15.98	16.67	17.97

Tabelle 5: $EEDI_{\text{Binnen}}$ bei unterschiedlichem Alter und Nennleistung der Antriebsmotoren

Die Kennwerte differieren bei einer Motorteillast von 10 % (Talfahrt) um 20 % und bei einer Motorteillast von 90 % um etwa 8 %.

Randbedingungen für einen energetischen Vergleich

Die große Spannweite des Energieeinsatzes bzw. der Abgasemission pro Ladungstonne eines hier betrachteten Schiffes liegt etwa zwischen 2,75 und 40,00 g CO₂/tkm und spiegelt die unterschiedlichen Einsatzbedingungen der Binnenschiffe wieder. Um Binnenschiffe untereinander energetisch zu vergleichen, müssen einheitlichen Bedingungen erarbeitet und vorgegeben werden.

Weiterhin muss vorgegeben werden, bei welchen Fahrwasserrandbedingungen ein Energieeinsparpotenzial vorhanden ist. Fahrzeuge, die für die Fahrt auf flachem Fahrwasser konzipiert werden, sind in der Regel bei der Fahrt auf tiefem Wasser energetisch schlechter als Fahrzeuge, die für die Fahrt auf tiefem Fahrwasser konzipiert wurden. Das Gleiche gilt auch in entgegengesetzter Konzeption. Eine Möglichkeit, beide Fahrwassergebiete zu betrachten und ein Fahrzeug zu bewerten besteht darin, die Fahrzeuge im Teillastbereich der Antriebsanlage zu untersuchen. Soll das Energieeinsparpotenzial des Fahrzeuges für ein bestimmtes Fahrgebiet energetisch ermittelt werden, dann müssen die spezifischen Referenzwerte bereitgestellt werden.

Die Erfassung der Leistungs-Geschwindigkeitsrelationen bei unterschiedlichen Wassertiefen-Tiefgangs-Bedingungen unter Strömungseinfluss sowie mit seitlich eingeschränktem Fahrwasser ist unter realen Bedingungen sehr komplex. Die aktuelle Wassertiefe und die Geschwindigkeit über Grund können heute in der Regel bordseitig erfasst, aber die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit, die in und quer zur Fließrichtung unterschiedlich ist, kann mit relativ einfachen Messungen nicht festgestellt werden. Hier besteht näherungsweise die Möglichkeit, dass das Schiff zu Berg und zu Tal mit gleicher Antriebsleistung fährt und die Geschwindigkeit gemessen wird, wobei die Lage des Schiffes innerhalb des Flusses in und quer zur Fließrichtung sowie der aktuelle Pegelstand gleich sein müssen.

Die Leistungs-Geschwindigkeitsrelationen des zu betrachtenden Fahrzeuges können innerhalb eines überschaubaren finanziellen Rahmen gemessen werden. Die Kosten einer Verbrauchsmessung, bei der der tatsächliche Brennstoffverbrauch unter Berücksichtigung des Vor- und Rücklaufes des Kraftstoffes, seiner Temperatur und des Impulsstromes sowie bei der Fahrt mit unterschiedlichen Schiffs- und Fahrwasserparametern sind deutlich höher.

Vorgezogene Schlussfolgerung aus der Bearbeitung des Forschungsvorhabens

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurde das Messequipment entwickelt und zusammengestellt, um über die Drehmoment- und Drehzahlmessung sowie einer zeitlichen Positions- und Wassertiefenerfassung das Leistungs-Geschwindigkeitsverhalten wassertiefenabhängig festzustellen. Das Messequipment ist mobil einsetz-

bar, allerdings müssen die Propellerwellen mit Dehnungsmessstreifen bestückt werden, was natürlich einige Zeit in Anspruch nimmt. Die Auswertung der sehr umfangreichen Datenblöcke der Messungen mit einem Fahrzeug zeigt, dass bei wiederholten Fahrten auf den gleichen Streckenabschnitten mit nahezu gleichem Tiefgang und Pegelständen die Geschwindigkeiten stark schwanken. Die Ursachen der Geschwindigkeitsschwankungen müssen nachträglich analysiert werden, um eine konkrete Geschwindigkeit zu erhalten. Dieser Vorgang ist zeitaufwendig und somit mit relativ hohen Personalkosten behaftet.

Die Akzeptanz der Schifffahrtstreibenden, eine derart kostenintensive Überprüfung eines möglichen Energieeinsparpotenzials, also für ein Ja/Nein-Ergebnis, wird als sehr gering eingestuft.

Dieser Kenntnisstand lag erst nach der intensiven Datenauswertung des Forschungsprojektes vor. Um dennoch für die Schifffahrtstreibenden einen kostengünstigen Test für die Beurteilung eines möglichen Energieeinsparpotenzials bereitzustellen, wurde ein Basistest entwickelt.

Es wird ein zweistufiger Weg verfolgt, um das Energieeinsparpotenzial festzustellen. In der ersten Stufe des Basistests soll das mögliche Energieeinsparpotenzial in Form eines $EED|_{\text{Binnen}}$ mit bordeigenen Mitteln bei stark eingeschränkten Randbedingungen ermittelt und den Vergleichswerten gegenübergestellt werden. Abhängig von dem Ergebnis, ob ein schlechtes, ausreichendes, normales, gutes oder sehr gutes Energieniveau vorhanden ist, kann der Schifffahrtstreibende entscheiden, ob er in die zweite Stufe, eine ausführliche Energiebewertung und –beratung; investieren möchte. Dabei können spezielle Schiffs- und Fahrwasserverhältnisse, die bei seinem Schiffsbetrieb im Vordergrund stehen; besonders berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Schussbericht wird die Beschreibung des Basistests vorgezogen; um eine chronologische Vorgehensweise für Ermittlung des Energieeinsparpotenzials zu beschreiben.

Basistest

Bestimmung der Referenzwerte

Die Abnahmebedingungen der Binnenschiffe für die Zulassung des Schiffsbetriebes, u. a. für den Rhein, werden in der Regel im tiefen Wasser durchgeführt. Dabei wird eine Mindestgeschwindigkeit von 13,0 km/h gefordert.

Für den energetischen Vergleich wird ebenso eine **Mindestgeschwindigkeit von 13,0 km/h** vorausgesetzt, um eine hohe Anzahl der Fahrzeuge mit einer Zulassung für den Rhein zu erreichen.

Eine Recherche unserer Modell- und Großversuche ergab, dass bei einer **Antriebsleistung**, die etwa dem **Betrag von 0,3 mal Tragfähigkeit** oder 0,3 mal (Verdrängung minus Schiffseigengewicht) entspricht, von den meisten Fahrzeugen die Min-

destgeschwindigkeit bei einer **Wassertiefe** von über **7,5 m** und/oder einem **Flottwasser von mindesten 1,4 mal Tiefgang** erreicht und überschritten wird. Bei einer Tragfähigkeit über **10000 t** kann dies nicht mehr gewährleistet und diese Fahrzeuge können nicht berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich um 2-spurig-2-gliedrige Schubverbände mit einem größeren Tiefgang als 3,5 m und 2-spurig-3-gliedrige Schubverbände mit einem größeren Tiefgang als 2,5 m. Die Häufigkeit dieser ausgeschlossenen Relationen der Fahrzeuge sind, gemessen an den Relationen, die von der gesamten Flotte eingesetzt werden; sehr gering und bleiben unberücksichtigt.

Die Antriebsmotoren werden in der Regel mit einem Prüfstandsprotokoll geliefert. Das Prüfstandsprotokoll enthält die Angaben des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (g/kWh) in Abhängigkeit zur Motorendrehzahl und -leistung sowie zur Belastung auf dem Prüfstand. Aus dem Prüfstandsprotokoll wird der Verbrauchswert bei einer Leistung von (30 % der Tragfähigkeit in kW) entnommen, ggf. müssen Zwischenwerte ermittelt werden. Üblicherweise bewegen sich die Verbrauchswerte zwischen **200 und 250 g/kWh**.

Für den Fall, dass kein Prüfstandsprotokoll vorliegt, wurde eine Funktion für einen mittleren spezifischen Kraftstoffverbrauch für ältere und neue bzw. Software-regelte Motoren für die Auswertung bereitgestellt. Die Datengrundlagen sind öffentlich zugängliche Prüfstandsprotokolle von zwei Motorengenerationen mit und ohne Softwareregelung. Die ermittelten mittleren spezifischen Kraftstoffverbräuche werden leistungsabhängig berechnet.

Die Fahrzeuge setzen für den Bordbetrieb Generatoren und dieselbefeuerte Heizungsanlagen ein. Die Gesamtleistung des **Bordbetriebes** beträgt etwa **7 kW/h** für den Einzelfahrer und etwa **10 kW/h** für den Schubverband.

Für die energetische Bewertung wird der vorgestellte **EEDI_{Binnen}-Kennwert** herangezogen. Er zeigt den Energieverbrauch pro Ladungstonne und Kilometer indirekt über die bei der chemischen Reaktion, also bei der Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff, entstehenden Kohlendioxidmenge pro Ladungstonne und Kilometer. Die Binnenschiffsflotte setzt hauptsächlich Dieselmotorkraftstoff für den Vortrieb ein, so dass der Faktor von **3,1** für die Umsetzung von einem Gramm Diesel in 3,1 Gramm Kohlendioxid (CO₂) nach der Verbrennung als annähernd konstant angesetzt werden kann.

Aus unserer Datenbasis sind die Schiffe ausgewählt worden, die auf tiefem Wasser im Großversuch getestet wurden. Die nachfolgenden aufgeführten Daten wurden beispielhaft für die Berechnung des **EEDI_{Binnen}-Kennwerts** herangezogen, Tabelle 6.

Schiffsdaten		
Schiffsname		NONAME
Schiffstyp		TMS
Schiffslänge	m	110
Schiffsbreite	m	10.5
Schiffstiefgang, max.	m	5
Tragfähigkeit, max.	t	2500
Motorendaten		
Motor Software geregelt Eingabe 1, ohne Eingabe 0		1
Nennleistung des Antriebes, mindestens 0.3 x Tragfähigkeit in kW	kW	1103
Drehzahl Motor, max.	1/min	800
Drehzahl Motor, min.	1/min	350
Leistung der Nebenaggregate	kW/h	7
Eingaben beim Test		
Wassertiefe	m	11
Schiffstiefgang, gemittelt	m	2.895
Tragfähigkeit mindestens 80 % der Maximaltragfähigkeit	t	2135
Testbedingung		
Drehzahl für den Test (wird intern berechnet)	1/min	623
Geschwindigkeit beim Test	km/h	15.00
Mindestflottwasser beim Test		ok
Leistungsanteil beim Test	%	58
Antriebsleistung beim Test (wird intern berechnet)	kW	641
spezifischer Verbrauch bei der Antriebsleistung im Test	g/(kW/h)	209

Tabelle 6: Beispiel für ein Schiff aus der Datenbasis

Es konnten 58 Großversuche aus unserem Datenbestand lokalisiert und eingesetzt werden. Die Ergebnisse werden in der nachfolgenden Matrix gezeigt. Unterhalb der Matrix befindet sich die Bewertungsskala. Die ausgewählten Großversuche waren in der Mehrzahl aus den Jahren vor 1990 und die Motoren hatten in der Regel keine softwaregeregelter Antriebsanlage. Somit würden die älteren Fahrzeuge mit einem $EEDI_{\text{Binnen}}$ von 14,5 mit neuer Motorentechnik zum Beispiel auf einen $EEDI_{\text{Binnen}}$ von 13 rutschen. Weiterhin hat sich der Stand der Technik im Hinblick auf die Schiffsform weiter entwickelt, so dass die Bewertung tendenziell zu einem kleineren $EEDI_{\text{Binnen}}$ -Kennwert liegen wird. Mit diesem Hintergrund wurde die Farbskala unter der Matrix in die Bereiche sehr gut, gut, normal, ausreichend und schlecht eingeteilt, Abbildung 5.

Nach 1990 liegen keine Großversuche von Binnenschiffen vor, bei denen der Kraftstoffverbrauch gemessen worden ist. Auch für den Vergleich von Kraftstoffverbrauchs- und Leistungsmessung, um den tatsächlichen spezifischen Treibstoffverbrauch zu messen, liegen keine Daten vor.

Abbildung 5: klassifizierter EEDI_{Binnen}-Kennwert

Bei einem EEDI_{Binnen}-Kennwert größer als 13 ist ein Energieeinsparpotenzial vorhanden und spätestens ab einem EEDI_{Binnen}-Kennwert größer 14 sollte eine genauere Untersuchung des Schiffes im Hinblick auf die Energieeinsparmöglichkeiten stattfinden.

Für die Bestimmung der $EEDl_{\text{Binnen}}$ an Bord in der ersten Stufe werden keine externen Messeinrichtungen benötigt. Üblicherweise befinden sich an Bord ein Drehzahlmesser für die Motorenanlage, ein Echolot und ein GPS-Gerät für die Geschwindig-

keitsmessung. Gegebenenfalls kann die Wassertiefe einer nautischen Karte entnommen werden und die Geschwindigkeit über eine Weg-Zeit-Messung erfolgen. Mit dem motorenzugehörigen Prüfstandsprotokoll wäre eine genauere Ermittlung möglich, aber es ist nicht unbedingt erforderlich.

Kosten entstehen für die energetische Bewertung in der ersten Stufe nicht.

Die Berechnungstabelle wird auf der Webseite www.dst-org.de veröffentlicht und kann dort kostenfrei bezogen werden.

Beschreibung des Basistests

Der Basistest kann für Binnenschiffe bis zu einer Tragfähigkeit von 10000 t durchgeführt werden. Ausschlaggebend für die Einschränkung ist die installierte Nennleistung der Antriebsmotoren. Die Antriebsmotoren müssen in der Summe eine Antriebsleistung von dem Zahlenwert $0,3 \times \text{Tragfähigkeit}$ in kW liefern. Wenn mehrere Antriebsmotoren vorhanden sind, so werden die Nennleistungen addiert.

Beispiel: Ein Fahrzeug mit 10000 t Tragfähigkeit und drei Antriebsmotoren von je 1200 kW soll getestet werden.

Bedingung: Der Zahlenwert $0,3 \times \text{Tragfähigkeit}$ muss kleiner sein als die Summe der installierte Gesamtantriebsleistung.

Prüfung: $(0,3 \times 10000)$ in kW ist kleiner als $(1200 + 1200 + 1200)$ in kW
 $3000 \text{ kW} < 3600 \text{ kW}$

Ergebnis: Die Antriebsleistungsbedingung wird erfüllt und das Fahrzeug kann erfolgreich getestet werden.

Die **Schiffsdaten** sind Eingangsdaten und nicht berechnungsrelevant.

Unter den **Motorendaten** ist einzutragen, ob der Motor mit einer Software geregelt wird oder nicht. Bei der Angabe der Nennleistung des Antriebes ist die Summe der Antriebsleistungen anzugeben, siehe auch unter Bedingung. Weiterhin sind die maximale Drehzahl und die minimale Drehzahl einzutragen. Die minimale Motorendrehzahl sollte ermittelt werden, indem die Motoren eingekuppelt werden und das Fahrzeug nach etwa 5 Minuten eine annähernd konstante Geschwindigkeit fährt. Für den Bordbetrieb werden Generatoren und dieselbefeuerte Heizungsanlagen eingesetzt. Dieser Verbrauch wird mit 7 kW pro Stunde eingeschätzt und kann den tatsächlichen Verhältnissen angepasst werden.

Die **Eingaben beim Test** sind die Wassertiefe, die mindestens $2,4 \times \text{Tiefgang}$ betragen soll, der aktuelle Schiffstiefgang und die aktuelle Tragfähigkeit des Schiffes, die mindestens 80 % der maximalen Tragfähigkeit betragen sollte. Ist die vorhandene Wassertiefe zu klein, erscheint unter den Testbedingungen „Flottwasser zu gering“, ansonsten „ok“.

Unter den **Testbedingungen** wird die Drehzahl des oder der Motoren für den Test angegeben. Mit dieser Drehzahl soll das Fahrzeug auf konstanter Wassertiefe und ohne Strömung eine Strecke von etwa 1,0 bis 2,0 Kilometer fahren. Dabei wird die Geschwindigkeit des Schiffes am GPS-Gerät abgelesen und eingetragen oder es erfolgt eine Weg-Zeit-Messung für die Geschwindigkeitsangabe. Der errechnete spezifische Verbrauch ist ein Mittelwert, der aus der Angabe, unter Motorendaten, Motor Software geregelt mit der Eingabe „1“ oder nicht geregelt mit der Eingabe „0“ intern berechnet wird.

Das **Testergebnis** ist der $EEDI_{\text{Binnen}}$ und wird in der Bewertungsskala angezeigt. Ist der $EEDI_{\text{Binnen}}$ kleiner als 13 ist ein relativ geringes Energieeinsparpotenzial vorhanden. Bei einem größeren $EEDI_{\text{Binnen}}$ als 13 ist ein Energieeinsparpotenzial vorhanden und entsprechend der Bewertung können weitere Untersuchungsschritte erfolgen. Je größer der $EEDI_{\text{Binnen}}$ desto erfolgsversprechender ist eine Investition in Umbaumaßnahmen zur Energieeinsparung.

Beispiel 1:

Am 27.07.2012 bekamen wir durch die Firma Lehnkering Reederei GmbH die Möglichkeit, dieses relativ einfache Untersuchungsschema an einem modernisierten Tankschiff zu testen. Das Tankschiff wurde zum Vuile Gat in den Niederlanden überführt, weil dort die Wassertiefe etwa 1100 m beträgt. Die Strömung war mit 0,1 bis 0,2 km/h sehr gering und konnte durch die Fahrt gegen und mit der Strömung bei gleicher Drehzahl der Hauptmaschine ermittelt und bei der Geschwindigkeitsmessung berücksichtigt werden. Das Ladungsgut benötigte bei dem Transport keine Heiz- oder Kühlenergie. Weitere Daten sind der Berechnungstafel, Abbildung 6, zu entnehmen.

Basistest : Ermittlung eines Energieeinsparpotenzials von Binnenschiffen bis zu einer Tragfähigkeit von 10000 t

Eingabefelder		
Schiffsdaten		
Schiffsname		Lehnkering
Schiffstyp		TMS
Schiffslänge	m	110
Schiffsbreite	m	10.5
Schiffstiefgang, max.	m	2.9
Tragfähigkeit, max.	t	2210
Motorendaten		
Motor Software geregelt Eingabe 1, ohne Eingabe 0		1
Nennleistung des Antriebes	kW	1103
Drehzahl Motor, max.	$1/min$	800
Drehzahl Motor, min.	$1/min$	350
Leistung der Nebenaggregate	kW/h	7
Eingaben beim Test		
Wassertiefe	m	11
Schiffstiefgang, gemittelt	m	2.895
Tragfähigkeit mindestens 80 % der Maximaltragfähigkeit	t	2135
Testbedingung		
Drehzahl für den Test (wird intern berechnet)	$1/min$	623
Geschwindigkeit beim Test	km/h	16.94
Mindestflottwasser beim Test		ok
Leistungsanteil beim Test	%	58
Antriebsleistung beim Test (wird intern berechnet)	kW	641
spezifischer Verbrauch bei der Antriebsleistung im Test	g/(kW/h)	211
EEDI_{Binnen}	Testergebnis	g CO₂/tkm
		11.71

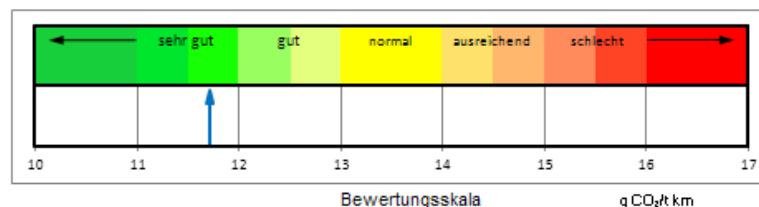


Abbildung 6: Beispiel 1

Mit einem EEDI_{Binnen} von 11,71 ist das untersuchte Tankmotorschiff ein energetisch sehr gutes Schiff. Ein Energieeinsparpotenzial ist nicht erkennbar.

Beispiel 2:

Im Jahr 1997 waren wir beratend für einen Schubverbandseigner tätig, der sein Fahrzeug aufgrund des hohen Treibstoffverbrauches wirtschaftlich nicht erfolgreich einsetzen konnte. Das Fahrzeug wurde auf einer Wassertiefe von 11,0 m getestet. Die Testergebnisse sind nachträglich in das Bewertungsverfahren aufgenommen worden, um den $EEDI_{\text{Binnen}}$ zu ermitteln, Abbildung 7.

Basistest : Ermittlung eines Energieeinsparpotenzials von Binnenschiffen bis zu einer Tragfähigkeit von 10000 t

Eingabefelder		
Schiffsdaten		
Schiffsname		NONAME
Schiffstyp		SV
Schiffslänge	m	171.5
Schiffsbreite	m	11
Schiffstiefgang, max.	m	3
Tragfähigkeit, max.	t	3583
Motorendaten		
Motor Software geregelt Eingabe 1, ohne Eingabe 0		1
Nennleistung des Antriebes	kW	1275
Drehzahl Motor, max.	$1/min$	1650
Drehzahl Motor, min.	$1/min$	390
Leistung der Nebenaggregate	kW/h	10
Eingaben beim Test		
Wassertiefe	m	11
Schiffstiefgang, gemittelt	m	2.3
Tragfähigkeit mindestens 80 % der Maximaltragfähigkeit	t	2701
Testbedingung		
Drehzahl für den Test (wird intern berechnet)	$1/min$	1426
Geschwindigkeit beim Test	km/h	12.40
Mindestflottwasser beim Test		ok
Leistungsanteil beim Test	%	64
Antriebsleistung beim Test (wird intern berechnet)	kW	810
spezifischer Verbrauch bei der Antriebsleistung im Test	g/(kW/h)	208
$EEDI_{\text{Binnen}}$	Testergebnis	$g\ CO_2/tkm$
		15.79

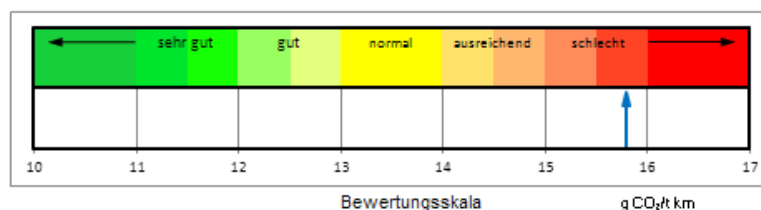


Abbildung 7: Beispiel 2

Mit einem $EEDI_{\text{Binnen}}$ von 15,79 zeigt sich der Schubverband nach dem Berechnungsschema als energetisch schlecht oder sehr schlecht. Nach dem damaligen Test wurde der Verband umgebaut, leider wurde er danach nicht mehr getestet, so dass die eingetretene Energieeinsparung nicht quantifiziert werden kann.

Dennoch wird festgestellt, dass mit dem erarbeiteten Berechnungsverfahren ein vorhandenes Energieeinsparpotenzial aufgezeigt werden kann.

Phase 2

4.2 Auswertungsverfahren

Das komplexere Auswertungsverfahren der Phase 2 verlangt Messungen an Bord, denen anschließend die Datenaufbereitung an Land und der abschließende Vergleich mit den Referenzdaten folgt.

4.2.1 Messeinrichtung an Bord

Für die Aufnahmen der Messwerte an Bord wurden im Rahmen dieses Projekts spezielle Schaltungen entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Zur Messung wird auf der Propellerwelle ein Messmodul befestigt, dessen Blockschaltbild in Abbildung 8 dargestellt ist. Die Elektronik wird von einem Akku-Pack versorgt. Das Messmodul enthält als zentrale Komponente einen Mikrocontroller, der die Aufnahme und Übertragung der Messwerte steuert.

Das Drehmoment einer drehenden Welle ist indirekt messbar. Die Torsion der Welle ist proportional zum Drehmoment, solange sie nur elastisch verformt wird. Die Torsion wird mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen, die in einem Winkel von 45° zur Längsachse auf die Welle aufgebracht sind. Das analoge Signal der Messbrücke wird mit einem externen Analog/Digital-Wandler mit Differentialeingang digitalisiert und im Mikrocontroller verarbeitet.

Die Drehbewegung der Welle wird mit einem Beschleunigungssensor erfasst. Dieser misst durch seine Drehung im Schwerfeld der Erde seine Lage auf der Welle. Es ergibt sich in der Zeit ein sinusförmiges Signal, mit dem die Propellerdrehrate bestimmt werden kann. Dies erfolgt im Mikrocontroller, der zyklisch beide Messwerte über ein Funkmodul an einen Empfänger überträgt, der in der Nähe im Maschinenraum installiert ist.

Zur Montage müssen also nur bei stillstehender Welle die Dehnungsmessstreifen aufklebt werden und das Messmodul mit dem Akku-Pack mittels Schlauchschellen an der Welle befestigt werden. Dieser Aufbau ist robust und einfach, hat allerdings den Nachteil, dass der Akkuwechsel nur bei stillstehender Welle erfolgen kann. In einer Weiterentwicklung ist geplant, das Messmodul berührungslos (induktiv) mit elektrischer Leistung zu versorgen, so dass ein kontinuierlicher Messbetrieb gewährleistet ist. In der jetzigen Konfiguration reicht die Akkukapazität (Lithium-Ionen-Akkus der Größe 18650) für einen Messbetrieb von ca. 5 Tagen. Da die Akkuspannung gemessen und auch mit zum Brückengerät gesendet wird, wird dem Benutzer angezeigt, wenn die Akkus gewechselt werden müssen.

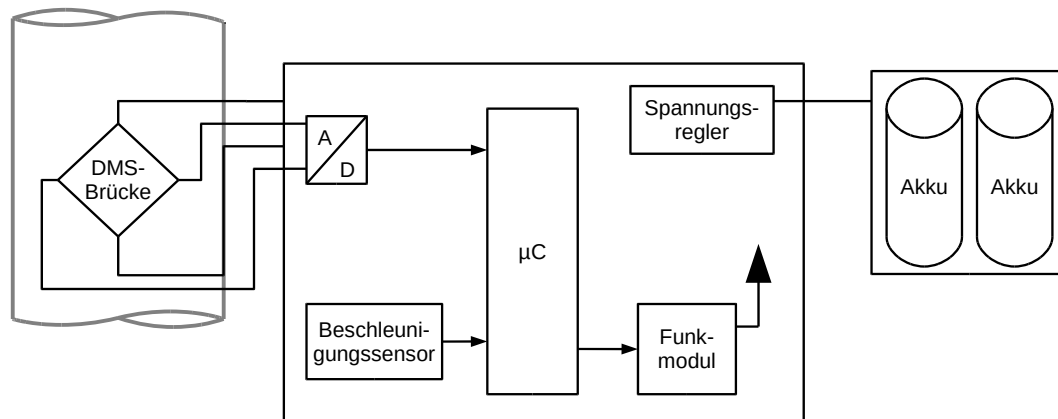


Abbildung 8: Blockschaltbild des Messmoduls auf der Propellerwelle

Das Messmodul auf der Propellerwelle sendet die Daten an ein Übertragungsmodul, das in der Nähe der Propellerwelle im Maschinenraum installiert ist. Dieses wird stationär über ein Netzteil aus dem Bordnetz versorgt und stellt im Wesentlichen die Schnittstelle zwischen der Funkverbindung zum Messmodul auf der Propellerwelle und der seriellen Datenverbindung zum Steuergerät auf im Brückenhaus dar. Abbildung 9 zeigt das Blockschaltbild des Übertragungsmoduls. Das Übertragungsmodul arbeitet vollständig wartungsfrei und hat keine Bedienelemente.

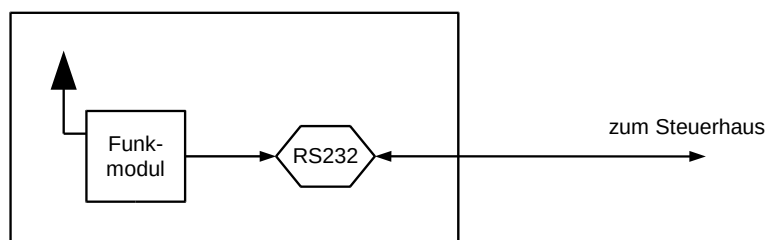


Abbildung 9: Blockschaltbild des Übertragungsmoduls im Maschinenraum

Die Übertragung der Daten vom Maschinenraum zum Brückengerät erfolgt über eine Kabelverbindung. Dies erfordert bei der Installation der Messeinrichtung an Bord einen gewissen Aufwand. Aufgrund der Abschirmwirkung der Stahlkonstruktion ist eine Funkverbindung aus dem Maschinenraum zur Brücke aber nicht zuverlässig genug.

Das Brückengerät dient dazu, alle Messwerte an Bord zentral zu erfassen. Es wird im Bedienbereich der Schiffsführung installiert. Abbildung 10 zeigt das Blockschaltbild der Brückengeräts.

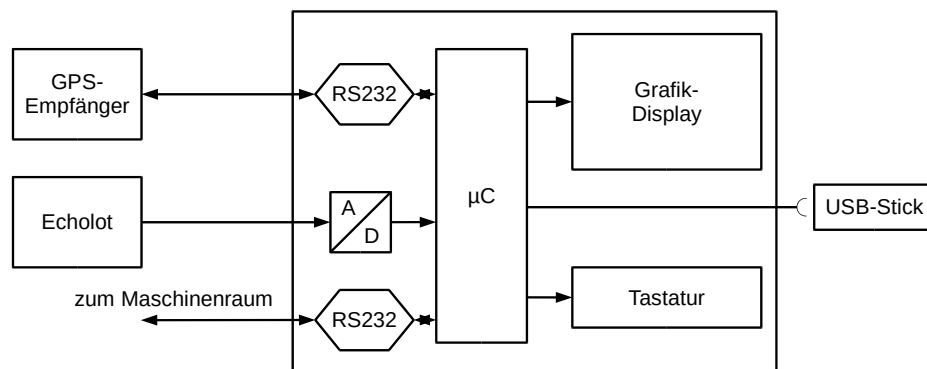


Abbildung 10: Blockschaltbild des Brückengeräts

Die Steuerung der Geräte übernimmt ein zentraler Mikrocontroller. Über eine serielle Schnittstelle ist der mit dem Übertragungsmodul im Maschinenraum verbunden und übernimmt über diese Schnittstelle die digitalen Daten des Torsionsmoments (Drehmoments) und der Drehrate. Über eine analoge Schnittstelle werden die Daten vom bordeigenen Echolot gelesen. Hier kommt wieder ein externer Analog/Digital-Wandler mit galvanischer Trennung zum Einsatz. Über eine weitere serielle Schnittstelle wird ein GPS-Empfänger angeschlossen, der die Daten mittels des NMEA 0183-Protokolls überträgt.

Der Mikrocontroller verarbeitet Benutzereingaben über verschiedene Tasten und zeigt aktuelle Zustandsdaten am angeschlossenen Grafik-Display an.

Die Messwerte werden auf einem USB-Stick (max. 2 GB) gespeichert, der während des Betriebs immer im Gerät eingesteckt sein muss. Damit lassen sich die Daten zur Auswertung einfach mitnehmen.

Die verschiedenen Messwerte werden zusammengefasst und im Sekundentakt in einem Datensatz gespeichert. Die Speicherung erfolgt zeilenweise in einer Textdatei.

Im Steuergerät werden, neben den Daten von der Schiffswelle, weitere Daten erfasst. Dies sind Daten vom GPS-Empfänger (Uhrzeit in UTC, Datum, Position (geographische Länge und Breite) und Geschwindigkeit über Grund). Das Gerät zeichnet außerdem 4 weitere Analogsignale im Bereich von $\pm 10V$ auf. Dazu gehört mindestens das Echolot.

Im Steuergerät wird aus Drehrate und Drehmoment die Wellenleistung berechnet:

$$P = 2\pi nQ$$

Das Gerät zeigt die aktuellen Werte von Drehmoment, Drehzahl, Leistung, Uhrzeit und Datum, Geschwindigkeit und Akku-Zustand auf einem Display an. Auf dem Display werden außerdem Dateiname und freier Speicherplatz angezeigt. Auf einem 2 GB-USB-Stick können die Messdaten von einem ½ Jahr gespeichert werden.

4.2.2 Datenaufbereitung

Die an Bord erfassten Daten werden in Textdateien gespeichert. Jede Sekunde wird eine Zeile mit den Spalten Datum, Zeit, Drehmoment backbord, Drehmoment steuerbord, Drehzahl backbord, Drehzahl steuerbord, Analog1, Analog2, Schiffsgeschwindigkeit, Breitengrad, Längengrad, Kurs und noch weiteren Kontrolldaten (Anzahl der GPS-Satelliten, Batteriespannung usw.) geschrieben.

Die Daten werden in Dateien gruppiert. Jede Datei enthält die Aufzeichnungen von 8 Stunden, also 28800 Sekunden (Zeilen). Die Dateien werden an Bord auf einer SD-Speicherkarte gespeichert.

Neben den elektronisch erfassten Daten der Schiffsbewegung müssen die manuell protokollierten Tiefgänge vorliegen. Der Schiffsführer führt hierzu eine Liste mit Datum und Tiefgang, in die er nach jedem Be- und Entladevorgang einen neuen Eintrag vornimmt. Tiefgangsänderungen durch Treibstoffverbrauch u. ä. können hier aufgrund der kurzen Auswertungszeiträume vernachlässigt werden.

Für die weitere Auswertung wurde ein eigenes Programm entwickelt, das eine weitgehend automatisierte Datenauswertung erlaubt. Zunächst werden alle Dateien der zu untersuchenden Periode zu einer Datei zusammengefasst. Dabei werden alle ungültigen Daten ausgefiltert. Gültige Daten werden anhand verschiedener Kriterien erkannt:

- Die Batteriespannung darf den zulässigen Spannungsbereich nicht unterschreiten, damit sichergestellt ist, dass korrekte Messwerte erfasst wurden.
- Der Kontrollzähler darf keine Aussetzer zeigen und die Zeilenprüfsumme muss stimmen, um sicherzugehen, dass die Daten korrekt auf die Speicherkarte geschrieben wurden.
- Die Anzahl der GPS-Satelliten darf nicht kleiner als 3 sein.
- Es muss ein gültiger Schiffstiefgang vorliegen.

Im praktischen Einsatz zeigt sich, dass das regelmäßige Laden der Akkus öfter versäumt wird und es so immer wieder zu Lücken in der Datenaufzeichnung kommt.

Die zusammengeführten Bewegungsdaten werden als nächstes nach Abschnitten untersucht, in denen das Schiff nur eine vernachlässigbare Änderung in Flottwasser, Geschwindigkeit und Kurs erfahren hat. Dies sind die Bereiche, in denen eine geradlinige Bewegung vorliegt, die am ehesten mit den Referenzbedingungen des Schleppkanals vergleichbar ist.

4.2.3 Vergleich mit Referenzdaten

Die Referenzdaten wurden in Propulsionsversuchen im ungestörten, ruhenden Wasser des Schleppkanals gewonnen. Dieser Strömungszustand stellt sich im regulären Schiffsbetrieb nicht ein. Das natürliche Flussprofil weicht sehr stark vom Rechteckquerschnitt des Schleppkanals ab. Im Fluss herrscht eine Strömung, die nicht nur in Fahrtrichtung, also dem Flussverlauf folgend, verläuft, sondern auch eine Querkomponente aufweist. Weiterhin ist die Strömungsgeschwindigkeit über dem gesamten Flussquerschnitt nicht konstant. Weitere äußere Krafteinwirkungen erfährt das Schiff durch andere passierende Schiffe und auch durch Windkräfte. Dazu kommt der Umstand, dass es nur sehr kurze Fahrabschnitte gibt, in denen das Schiff nicht manövriert, d. h. mit neutralem Ruderwinkel und ohne weitere aktivierte Steuerorgane fährt. Für die auszuwertenden Abschnitte müssen folgende Bedingungen gelten:

$$\frac{|Q - \bar{Q}|}{\bar{Q}} < \varepsilon_Q$$

$$\frac{|\beta - \bar{\beta}|}{\bar{\beta}} < \varepsilon_\beta$$

$$\frac{|V - \bar{V}|}{\bar{V}} < \varepsilon_V$$

$$\frac{|h - \bar{h}|}{\bar{h}} < \varepsilon_h$$

Für die ermittelten Fahrabschnitte wird anhand der Koordinaten ermittelt, ob das Schiff zu Tal oder zu Berg gefahren ist. Mit dieser Information kann die über GPS gemessene Geschwindigkeit über Grund in die Geschwindigkeit durch das Wasser umgerechnet werden. Anhand der Geschwindigkeit durch das Wasser kann der Squat berechnet werden, mit dem in Kombination mit der Abladetiefe und des Flottwassers sich dann wiederum der Wasserstand berechnen lässt.

Es ergibt sich also ein nichtlineares und implizit formuliertes Gleichungssystem

$$\begin{aligned} V_{\text{üG}} &= V_{\text{dW}} + V_{\text{Str}} \\ V_{\text{Str}} &= f(h) \\ z_V &= f(V_{\text{dW}}, h, T) \\ h &= \text{Echolot} + z_V + T \end{aligned}$$

das iterativ gelöst wird. Hierin sind $V_{\text{üG}}$ die Schiffsgeschwindigkeit über Grund, die vom GPS gemessen wird, V_{dW} die Geschwindigkeit durch das Wasser und V_{Str} die Strömungsgeschwindigkeit in Fahrtrichtung. h bezeichnet die Wassertiefe, T den Schiffstiefgang und z_V die dynamische Absenkung.

Der Squat wird aus den Referenzdaten interpoliert und ist damit genauer als es eine Abschätzung mittels einer der zahlreichen veröffentlichten Squatformel ist. Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit aus der Wassertiefe erfolgt durch Approximationsformeln. Dies stellt das größte Problem im gesamten Verfahrensablauf dar. Zunächst ist die Flussströmung nicht homogen und kann in diesem Sinne eigentlich auch nicht als Funktion in Abhängigkeit von der Wassertiefe dargestellt werden. Um aber trotzdem den Einfluss der Strömung berücksichtigen zu können, wurden aus numerischen Berechnungen der Rheinströmung für den Bereich des Fahrwassers und für verschiedene Flussquerschnitte die Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von der Wassertiefe als Polynom approximiert.

Damit sind dann die Geschwindigkeit durch das Wasser, die Wassertiefe und der Tiefgang bekannt.

Mit

$$P_D = f(V_{dW}, h, T)$$

und

$$EEDI = f(P_D, \dots)$$

lassen sich dann der für das zu untersuchende Schiff gemessene

$$EEDI_{\text{mess}} = f(P_{D_{\text{mess}}}, \dots)$$

mit dem für das zu vergleichenden Referenzschiff interpolierten

$$EEDI_{\text{ref}} = \tilde{P}_{D_{\text{ref}}}(V_{dW}, h, T, \dots)$$

vergleichen.

5. Probelauf und Kalibrierung

Das vollständige System wurde zum ersten Mal im Oktober 2011 am Tankschiff *Svenja Reich* eingesetzt. Dazu wurde zunächst bei ruhendem Schiff das Messsystem installiert. Auf der Antriebswelle wurden die Dehnmessstreifen aufgeklebt und das Messmodul mit den Akkus befestigt. Daneben wurde im Maschinenraum das Übertragungsmodul befestigt. Von diesem wurden Kabel vom Maschinenraum zum Bediengerät auf der Brücke verlegt. Das Bediengerät wurde an das 230 V-Bordnetz angeschlossen. Außerdem wurden ein GPS-Empfänger und das an Bord installierte Echolot angeschlossen.

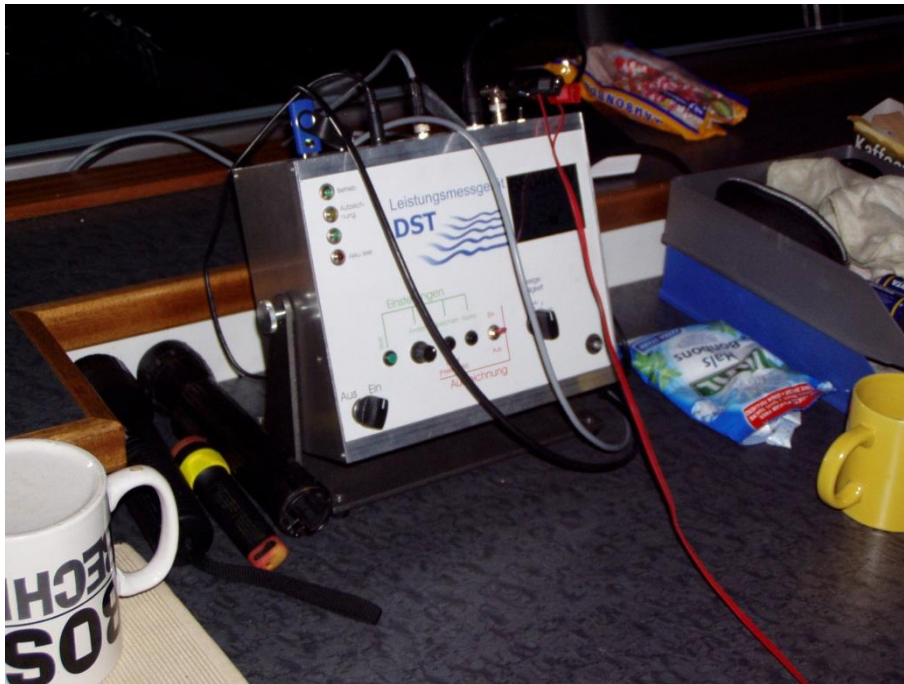


Abbildung 11: Bediengerät auf der Brücke

Über eine Zeitspanne von mehreren Wochen wurden dann während des normalen Schiffsbetriebs auf dem Rhein Daten aufgezeichnet.

Dabei stellte sich schnell heraus, dass der Akkubetrieb der Messelektronik auf der Propellerwelle ein kritischer Punkt im Messsystem ist. Die Akkukapazität reicht für ca. 5 Tage Betrieb. Allerdings können die Akkus nur bei stehender Welle gewechselt werden. Gerade, wenn das Schiff im Hafen liegt, ist die Besatzung mit den Lade- und Löscharbeiten beschäftigt und kann sich nicht immer um den Akkuwechsel kümmern. So wurde innerhalb der Zeitspanne, in der das System an Bord installiert war, in längeren Perioden auch nicht gemessen bzw. die Daten waren wegen zu geringer Akkuspannung nicht verwertbar. Zukünftig soll das Messsystem auf der Welle deshalb berührungslos (induktiv) mit elektrischer Energie versorgt werden.

Insgesamt wurden ca. 1,3 Mio. Datensätze erfasst, die sich auswerten lassen. Wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, wurden hieraus die Abschnitte herausgefiltert, in denen

das Schiff möglichst ungestört geradeaus fährt. In diesen Abschnitten lassen sich die gemessenen Leistungsdaten bzw. die daraus abgeleiteten EED_{Binnen} mit denen aus den Modelluntersuchungen vergleichen. Für die Filterfunktionen wurden folgende Grenzwerte verwendet:

maximale relative Abweichung des Moments	ε_Q	0,03
maximale relative Abweichung des Kurswinkels	ε_β	0,03
maximale relative Abweichung der Geschwindigkeit	ε_V	0,03
maximale relative Abweichung der Wassertiefe	ε_h	0,2

Mit Hilfe dieses Filters wurden 93 Abschnitte gefunden, die im Weiteren ausgewertet werden konnten. Die Bahnlinien der ausgewerteten Abschnitte sind in Abbildung 12 dargestellt.

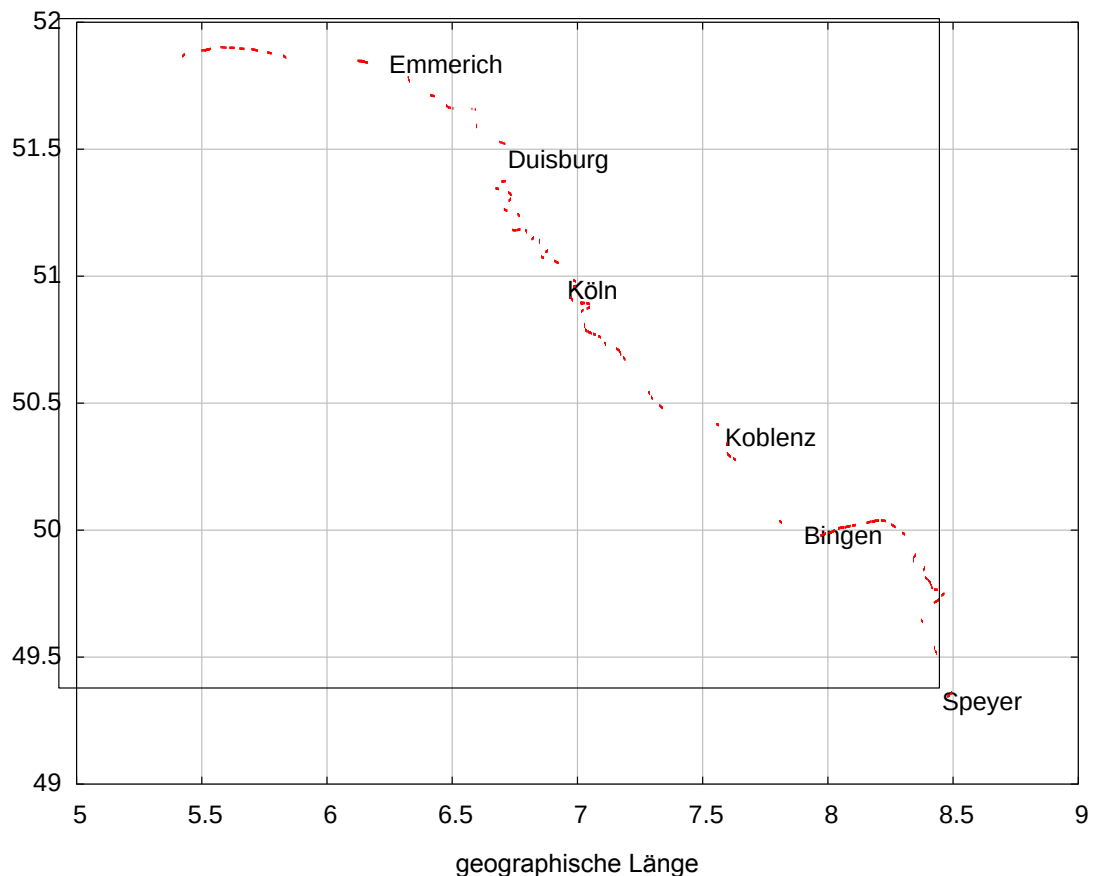


Abbildung 12: Geografische Darstellung der für die weitere Auswertung gefilterten Abschnitte der Messdaten

Für diese Fahrabschnitte wird anhand der GPS-Position und des Kurswinkels die Fahrtrichtung im Fluss (Berg- oder Talfahrt) bestimmt. Dies ist wichtig, um das Vorzeichen für die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Unter Einbeziehung der Strömungsgeschwindigkeit wurden dann iterativ die Wassertiefen ermittelt und damit die Propulsionsleistungen für das Referenzschiff berechnet.

Aus den 93 Abschnitten wurden schließlich 4 Gruppen gebildet, in denen der Tiefgang gleich und die Wassertiefe annähernd gleich war. Innerhalb dieser Gruppen wurden die Mittelwerte für die gemessenen und für das Referenzschiff berechneten Propulsionsleistungen gebildet.

$\bar{h}$ m	$\bar{T}$ m	tdw t	$\bar{V}_{\text{üG}}$ km/h	$\bar{V}_{\text{Str}}$ km/h	Fahrtrichtung	EEDI _{mess}	EEDI _{ref}
4,75	2,65	1972	10,84	4,81	zu Berg	26,44	31,24
5,95	1,60	702	12,57	5,50	zu Berg	56,55	60,54
6,34	2,75	2093	11,87	5,66	zu Berg	23,22	27,27
7,60	3,02	2419	19,44	6,27	zu Tal	10,41	8,79

Das untersuchte Schiff zeigt also in den ersten drei ausgewerteten Abschnitten ein günstigeren EEDI_{Binnen} als das Referenzschiff, im letzten Abschnitt ist der EEDI_{Binnen} des Referenzschiffes dagegen günstiger.

6. Diskussion und Ausblick

Die Auswertung der gemessenen Daten und der Vergleich mit dem Referenzschiff zeigen plausible Ergebnisse. Das untersuchte Schiff hat überwiegend einen günstigeren $EEDl_{\text{Binnen}}$ -Wert als das Referenzschiff, was auch den Erfahrungen des Schiffsführers entspricht. Diese Untersuchungsergebnisse geben für die Schiffseigner keinen Anlass, vertiefte Entwicklungsarbeit zu investieren, um weitere Verbesserungen zu erreichen.

Das Messverfahren an Bord ist robust und kann mit relativ geringem Aufwand installiert werden. Im Betrieb zeigte sich allerdings eine Schwachstelle: Das Laden der Akkus auf der Welle erfolgte nicht konsequent, so dass während der gesamten Untersuchungszeitspanne immer wieder große Lücken aufgetreten waren, in denen keine oder ungültige Daten aufgezeichnet wurden. Dieses Problem wird in einer weiterentwickelten Version des Messmoduls durch kontinuierliche, induktive Stromversorgung behoben.

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten erfolgt mit der eigens entwickelten Software nahezu automatisch. Der Datenbestand für die Referenzschiffe ist umfangreich und kann gegebenenfalls durch Modellversuche mit den vorhandenen Methoden erweitert werden.

Eine Schwierigkeit in der Auswertung stellt allerdings die Empfindlichkeit des Berechnungsverfahrens gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit dar. Diese kann zur Zeit nur indirekt ermittelt werden und es kann dafür keine Genauigkeitsabschätzung geliefert werden. Damit kann auch – zumindest für eine einzelne Messung – keine Genauigkeit für die Auswertung und den Vergleich mit dem Referenzschiff gegeben werden. Weitere Einflüsse, die quantitativ nicht erfasst werden können, sind Störungen durch andere Verkehrsteilnehmer (Begegnen/Überholen) und die hydrodynamische Wechselwirkung mit der variablen Bodentopographie.

Um eine aus analytischer Sicht sicherere Aussage über die Leistungsfähigkeit eines Schiffes zu treffen und um den $EEDl_{\text{Binnen}}$ und den Referenz- $EEDl_{\text{Binnen}}$ zuverlässig zu bestimmen, ist es erforderlich, die Rahmenbedingungen bei der Messfahrt genauer zu kennen. Es wird deshalb empfohlen, Messfahrten in Gewässern oder Streckenabschnitten durchzuführen, deren Bodentopographie bekannt ist und möglichst wenig (instationären) Einfluss auf das Schiff ausübt. Weiterhin sollte die am Schiff wirksame Strömungsgeschwindigkeit bekannt sein – idealerweise sollte sie verschwinden. Und schließlich sollte die Messung bei stationärer Fahrt ohne den Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer durchgeführt werden.

Die praktischen Gegebenheiten in der Binnenschifffahrt lassen solche Messfahrten jedoch kaum zu, zumal es das eigentliche Ziel ist, die Leistungsfähigkeit im praktischen Einsatz zu beurteilen.

Deshalb wurde hier ein anderer Auswertungsansatz angewendet: Durch eine Mittelwertbildung über eine Vielzahl von Messungen sollen diese Einflüsse möglichst verschwinden. Wegen der o. g. Aussetzer bei der Datenaufzeichnung konnte in diesem

Projekt nur für bestimmte Betriebszustände eine zufriedenstellend große Datenmenge erreicht werden. Mit einem verbesserten Messmodul wird es allerdings möglich sein, entsprechende Datenmengen zu erfassen und eine genauere und detailliertere Auswertung zu erreichen.

Durch eine Messung der Anströmgeschwindigkeit am Schiff mit Hilfe von optischen Messverfahren könnte eine wesentliche Verbesserung in der Messgenauigkeit der Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden. Derartige Messverfahren stehen heute zur Verfügung. Sie konnten im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht mehr zum Einsatz kommen, stellen aber eine Anregung für weitere, vertiefte Untersuchungen dar.

Grundsätzlich wirft dieses Projekt wieder die Frage auf, inwieweit sich die im Versuchstank unter kontrollierten, idealen Bedingungen gemessenen Schiffseigenschaften auf den realen Schiffsbetrieb übertragen lassen. Die aus dem Modellversuch für die Großausführung gewonnenen Leistungsprognosen haben eine hohe Genauigkeit. Nur werden die Schiffe kaum unter diesen Bedingungen eingesetzt. Sowohl für die hier durchgeführte Analyse der Leistungsfähigkeit von Schiffen als auch für andere Berechnungsverfahren, bei denen die Leistungsfähigkeit von Schiffen unter realen Einsatzbedingungen bekannt sein muss, wäre es ein großer Gewinn, wenn hierfür geeignete mathematische Modelle zur Übertragbarkeit der Modellmessungen gefunden werden könnten. Dies sollte Gegenstand weiterer Forschung sein.

7. Ergebnistransfer

7.1 Nutzen für KMU

Die vorgestellten Verfahren zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Binnenschiffen und der Vergleich mit dem Stand der Technik ermöglichen jedem Schiffseigner eine schnelle Einschätzung, ob sich für das jeweilige Schiff Verbesserungspotential bietet und inwieweit es konkurrenzfähig ist.

Durch den zweistufigen Aufbau des Verfahrens konnten die Aufwendungen und Entwicklungsrisiken minimiert werden. Die erste Phase ist für den Schiffseigner völlig kostenlos und erfordert kein externes Expertenwissen. In der zweiten Phase kann mit geringem finanziellen Aufwand eine detaillierte Beurteilung erfolgen, die darüber Auskunft gibt, ob es mit einem gewissen Entwicklungsaufwand möglich ist, das Schiff in Hinblick auf den Energieverbrauch zu verbessern und auf den gleichen Stand der Konkurrenz zu bringen.

7.2 Veröffentlichungen

Nach dem Abschluss des Vorhabens wird ein zusammenfassender Bericht auf der Internetseite des DST veröffentlicht. Gleichzeitig wird auch das internetbasierte Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit und Berechnung des EEDI_{Binnen} unter <http://www.dst-org.de/espote> bereitgestellt.

7.3 Schutzrechte

Für die in diesem Vorhaben entwickelten Verfahren werden keine Schutzrechte beantragt.

7.4 Transferkonzept

Zeitraum	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
Projektende (August 2012)	Beratung des projektbegleitenden Ausschusses (1 Termin)	Statt einer Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses, fand die Diskussion der Ergebnisse in Einzelgesprächen statt.
Mitte 2012	Internetpräsentation	Auf eine vorläufige Präsentation von Zwischenergebnissen auf der DST-Homepage wurde zugunsten der beginnenden Entwicklung des Internet-Tools verzichtet.
Ende 2012	Vortrag beim Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen (VBW), Fachausschuss Binnenschiffe	Präsentation und Diskussion von Zwischenergebnissen bzw. Ergebnissen gegenüber Vertretern von Binnenschifffahrtsunternehmen, Repräsentanten von Werften, Zulieferbetrieben und Ingenieurbüros sowie Klassifikationsgesellschaften und der Berufsgenossenschaft
Ende 2012	Abschlussbericht	Die Zusammenstellung und Dokumentation der Projektergebnisse erfolgt hiermit.
2012/2013	Kontakt zu potenziell interessierten Unternehmen	Information des Binnenschifffahrtsgewerbes über das Verfahren zur Abschätzung von Energieeinsparungspotenzialen von Binnenschiffen
Anfang 2013	Veröffentlichung von Projektergebnissen über gewerbespezifische Newsletter	Information des Binnenschifffahrtsgewerbes über das Verfahren zur Abschätzung von Energieeinsparungspotenzialen von Binnenschiffen
Anfang 2013	Internetpräsentation der Projektergebnisse	Veröffentlichung der Projektergebnisse auf der DST-Homepage als Bericht und als internetbasiertes Tool zur Benutzung durch die Schiffeigner
2013	Vortrag im Wissenschaftlich-Technischen Ausschuss (WTA) des DST	Präsentation der Projektergebnisse gegenüber Vertretern von Binnenschifffahrtsunternehmen, Repräsentanten von Werften, Zulieferern und Ingenieurbüros, der Wasser und Schifffahrtsverwaltung sowie von Wissenschaft und Forschung
2013	Kontakt zu potenziell interessierten Unternehmen	Information des Binnenschifffahrtsgewerbes über das Verfahren zur Abschätzung von Energieeinsparungspotenzialen von Binnenschiffen

8. Arbeitsanleitungen

8.1 Phase 1

Eine grobe Abschätzung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ und der Leistungsfähigkeit des Schiffs kann durch die Schiffsbesatzung selbstständig erfolgen. Die dazu anzuwendende webbasierte Programm ist unter

<http://www.dst-org.de/espot>

zu erreichen.

8.2 Phase 2

Die genauere und detaillierte Ermittlung des $EEDI_{\text{Binnen}}$ und der Leistungsfähigkeit des Schiffs erfordert die Installation der Messelektronik, die z.B. durch geschulte Mitarbeiter des DST erfolgen kann. Die Bedienung des Brückengeräts erfolgt durch die Schiffsbesatzung und erfordert nur wenige Handgriffe.

Einschalten

Das Gerät wird mit Schalter links unten eingeschaltet.

Starten der Aufzeichnung

Zum Aufzeichnen muss ein USB-Stick oben links im Gerät eingesteckt sein. Nach Einstecken mit der Taste "nächster Dateiname" den nächsten freien Dateinamen suchen. Dabei wird auch der freie Speicherplatz angezeigt. Den Schalter „Aufzeichnung“ in Stellung "Ein" stellen. Damit startet die Aufzeichnung.

Alle 8 Stunden wird automatisch eine neue Datei erstellt. Damit sind die Dateien ca. 3,6 MB groß (jede Sekunde 128 Byte). Der Dateiname wird automatisch vergeben nach dem Muster: m####.csv (mit ### als fortlaufender Nummer).

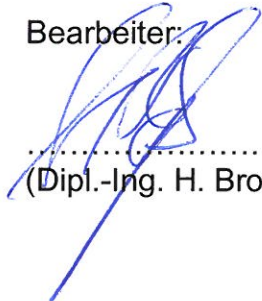
USB-Stick wechseln

Den Schalter "Aufzeichnung" in Stellung "Aus" stellen, USB-Stick entfernen und neuen USB-Stick einstecken. Danach wird die Aufzeichnung wie oben beschrieben neu gestartet.

Achtung: Der USB-Stick darf während einer laufenden Aufzeichnung nicht entfernt werden!

Duisburg, 20.12.2012
Br/He/KI

Bearbeiter:

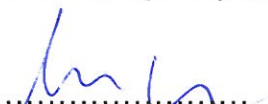

.....
(Dipl.-Ing. H. Broß)


.....
(Dr.-Ing. R. Henn)

Projektleiter:


.....
(Dipl.-Ing. Th. Guesnet)

DST – Entwicklungszentrum für
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.


.....
(Prof. Dr. P. Engelkamp)
Institutsdirektor

Literatur

- [1] Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung des technischen Alters modernisierter Binnenschiffe aus sicherheitstechnischer Sicht
DST-Bericht 2010, AiF, Duisburg 2011

- [2] Power requirements of typical inland cargo ships and pushed trains for the operation in restricted waterways
DST-Bericht 1634, DTU Dänemark, Duisburg 2002

- [3] INBAT - Innovative Schubverbände zum wirtschaftlichen Einsatz auf flachen Wasserstraßen
(INBAT - INnovative BAрге Trains for effective Transport on shallow water)
DST-Bericht 1652, EU + BMBF, Duisburg 2005

- [4] INTERMODESHIP
Optimisation of hull form for restricted waters
DST-Bericht 1690, EU, Duisburg 2003
Resistance tests in deep and shallow water
DST-Bericht 1691, EU, Duisburg 2003

- [5] CONBIN
Entwicklung innovativer Containerschiffe für Binnenwasserstraßen zur Bewältigung wachsender Aufkommensmengen im Seehafenhinterlandverkehr
DST-Bericht 1754, NRW-EU Programm, Ziel 2, Duisburg 2005

- [6] Zukunftsorientierte Technologien zur Modernisierung der Binnenschiffsflotte; Chancen und Möglichkeiten einer beschleunigten Implementierung technischer Neuerungen in bestehende Binnenschiffe
DST-Bericht 1769, AiF, Duisburg, 2005

- [7] Modernisierung der vorhandenen Binnenschiffsflotte durch Vergrößerung der Hauptabmessungen, Reduzierung der Fixpunkthöhe und Austausch des Hinterschiffs
DST-Bericht 1852, NRW, Duisburg 2007

- [8] SICHERBIN
Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Binnenwasserstraßen an Engpass- und Gefahrenstellen
DST-Bericht 1818, BMBF, Duisburg 2007