

ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH



Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD

Endbericht

Im Auftrag des Umweltbundesamtes
FKZ 3711 45 105

30. November 2013

Angaben zum Vorhaben

Projekt:	Aktualisierung und Recherche zu Emissionsfaktoren von Euro 5- und Euro 6-Fahrzeugen und nachgerüsteten Kfz und Übertragung der Daten ins Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) und in TREMOD
Auftraggeber:	Umweltbundesamt
FKZ-Nummer:	3711 45 105
Arbeitspaket:	800
Titel:	Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD
Verantwortung:	Die Verantwortung für den Inhalt dieses Gutachtens liegt bei den Autoren. Die hier dargestellten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen müssen nicht mit denjenigen des Auftraggebers übereinstimmen.
Fachliche Bearbeitung:	Wolfram Knörr, Christoph Heidt ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg Tel. +49 (0) 6221-4767-0; Fax +49 (0) 6221-4767-19 Internet: www.ifeu.de Martin Schmied, Benedikt Notter INFRAS – Forschung und Beratung Mühlemattstrasse 45, CH-3007 Bern, Schweiz Tel.: +41(0) 31 / 370 19 19; Fax: +41 (0) 31 / 370 19 10 Internet: www.infras.ch
Gestaltung:	IFEU Heidelberg und INFRAS
Redaktionsschluss:	30. November 2013

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Hintergrund und Aufgabenstellung.....	7
2 Verkehrsmengengerüst.....	8
2.1 Schiffsbestände	8
2.2 Ermittlung differenzierter Fahr- und Transportleistungen	10
2.2.1 Güterstatistik des statistischen Bundesamtes	10
2.2.2 Zusätzliche Annahmen	11
3 Spezifische Energieverbrauchswerte	19
3.1 Vorgehensweise in der Vorstudie	19
3.2 Vergleich der Ergebnisse der Vorstudie mit Messwerten und Ergebnissen anderer Studien	24
3.3 Vergleich der Ergebnissen der Vorstudie mit Ergebnissen für einzelne Flussabschnitte	27
3.4 Anpassung der Dieserverbrauchswerte für Hauptmotoren der Vorstudie	31
3.4.1 Gütermotorschiffe	32
3.4.2 Schubverbände.....	35
3.4.3 Weitere Schiffstypen	39
4 Spezifische Emissionsfaktoren	40
4.1 Emissionsfaktoren von Binnenschiffsmotoren.....	40
4.1.1 Abgrenzung und Einflussfaktoren.....	40
4.1.2 Untersuchte Datenquellen und Ableitung der TREMOD-Werte	42
4.2 Zuordnung der Emissionsfaktoren zur Binnenschiffsflotte.....	44
4.2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise und Methodik	44
4.2.2 Altersverteilung der Hauptmotoren auf Binnenschiffen	46
4.2.3 Aggregierte Emissionsfaktoren nach Flottenmerkmalen	47
5 Ergebnisse und Diskussion für die Jahre 2010 bis 2012.....	49
5.1 Verkehrsmengen und Energieverbrauch	49
5.1.1 Ergebnisse für die einzelnen Ladungsarten	49
5.1.2 Ergebnisse differenziert nach Flussstraßen	50
5.1.3 Einfluss der Tragfähigkeit und der mittleren Auslastung	53
5.2 Schadstoff- und Treibhausgasemissionen	53
5.2.1 Gesamtemissionen in Deutschland und Vergleich mit TREMOD 5.3	53
5.2.2 Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren mit anderen Quellen	54
6 Berechnung einer Zeitreihe von 1994 bis 2030	56
6.1 Daten und Annahmen für die Zeitreihenberechnung.....	56
6.1.1 Rückschreibung von 1994 bis 2009	56
6.1.2 Anpassungen für die Bezugsjahre vor 1993.....	57
6.1.3 Entwicklung bis 2030	57
6.2 Ergebnisse für die Jahre 1980 bis 2030.....	60

7	Literaturverzeichnis	63
8	Abbildungsverzeichnis	65
9	Tabellenverzeichnis	67
10	Abkürzungsverzeichnis	69
11	ANHANG	70
11.1	Zusammenfassung des Workshops ‚Energieverbrauch und Emissionen der Binnenschifffahrt‘ am 15.11.12	70
11.1.1	Begrüßung und Projekthintergrund.....	70
11.1.2	Block 1: Schiffsaktivitäten	70
11.1.3	Block 2: Energieverbrauch.....	71
11.1.4	Block 3: Emissionen	72
11.1.5	Ausblick 73	
11.1.6	Teilnehmerliste.....	74
11.2	Verwendete Kenndaten für die Berechnung des Dieserverbrauchs der Hauptmotoren der Binnenschiffe	75

Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurden aktuelle Informationen zu den Transportleistungen, spezifischen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren für die Binnenschifffahrt in Deutschland zusammengetragen, aufbereitet und analysiert. Darauf aufbauend wurde eine **Berechnungsmethodik** entwickelt, die es erlaubt, die Umweltwirkungen der Binnenschifffahrt **differenzierter und realitätsnaher als bisher** zu berechnen. Dazu wurde ein eigenes Berechnungstool erstellt und eine detaillierte Hochrechnung für Deutschland für die Bezugsjahre 2010 bis 2012 durchgeführt.

Basis des **Verkehrsmengengerüstes** ist die Binnenschifffahrtsstatistik des statistischen Bundesamtes. Diese enthält auf Grundlage von Hafen- und Schleusenbefragungen detaillierte Informationen zu den Gütertransporten auf Binnenschiffen in Deutschland. Wichtigste Eingangsgrößen sind die Fahr- und Verkehrsleistungen, differenziert nach Schiffs- und Ladungsmerkmalen sowie nach räumlicher Aufteilung (Flussstraßen). Als Ergänzung zu den Originaldaten der Güterstatistik mussten zusätzliche Annahmen zu den Schiffsfahrten, zusätzlichen Leerfahrten und der Aufteilung von Leichtern (Schiffe ohne eigenen Antrieb) auf Schubverbände getroffen werden.

Für die **Berechnung des Energieverbrauchs** der Binnenschifffahrt wurde ein Bottom-up-Ansatz entwickelt, der spezifische Energieverbrauchswerte mit dem ermittelten Verkehrsmengengerüst verknüpft. Die spezifischen Energieverbrauchswerte werden dabei mittels einer differenzierten Berechnungsformel abgeleitet, die eine Berücksichtigung des Einflusses verschiedener Schiffstypen, der Tragfähigkeit der Schiffe, des Beladungszustandes sowie des Gewässertyps erlaubt. Die im Rahmen dieses Vorhabens verwendeten Verbrauchswerte wurden basierend auf flussspezifischen Verbrauchswerten abgeleitet und mit Hilfe von Literatur- und Einzelmesswerten plausibilisiert. Der über alle Schiffstypen und -klassen gemittelte Dieserverbrauch in den Jahren 2010 bis 2012 liegt zwischen 8,3 g/tkm und 9,1 g/tkm. Letzterer Wert für das Jahr 2011 zeigt dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit einem über Kraftstoffstatistiken rückgerechneten Wert von 9,3 g/tkm Dieselmotorkraftstoff für Westeuropa.

Spezifische Emissionsfaktoren für regulierte Schadstoffe (NO_x, PM, CO, HC) wurden anhand einer breiten Basis von Messwerten und Literaturangaben abgeleitet. Differenziert wurden diese über das Alter der eingesetzten Hauptantriebsmotoren. Es zeigt sich, dass die spezifischen Emissionen seit 1970 konstant gesunken sind, mit Ausnahme der NO_x-Emissionen, welche erst nach der Einführung von verbindlichen Emissionsgrenzwerten (seit 2001 über ZKR I) sinken. Um die Emissionsfaktoren der Motoren dem Verkehrsmengengerüst zuzuordnen, erfolgte eine Untersuchung der Binnenschiffsflotte hinsichtlich des Alters der eingebauten Motoren, differenziert nach Größenklassen und Flaggen. Hierbei zeigt sich, dass größere Schiffe aufgrund der neueren Motoren tendenziell niedrigere Emissionen haben als kleinere. Auch sind die spezifischen Emissionen der niederländischen Flotte etwas geringer als die der deutschen.

Das **wichtigste Gesamtergebnis** der Detailberechnung ist, dass der Energieverbrauch und die Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2012 niedriger sind als bisher in TREMOD berechnet wurde. Der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen liegen je nach Bezugsjahr um 5-13 % niedriger, die NO_x-Emissionen liegen um 12-19 %, PM um 30-37 %, CO um 16-21 % und HC um 43-49 % niedriger.

Zusätzlich zu der detaillierten Auswertung der Realjahre 2010 bis 2012 wurde die Emissionsberechnung auf eine **Zeitreihe von 1994 bis 2030** erweitert. Die vergangene und zukünftige Entwicklung berücksichtigt dabei die Transportleistungen insgesamt, sowie die

Veränderungen innerhalb der Binnenschiffsflotte. Letztere bewirken eine Verschiebung der Transportleistung von kleineren hin zu größeren Schiffen, sowie die Senkung des spezifischen Energieverbrauchs und der spezifischen Emissionen. Der Dieserverbrauch der Binnenschifffahrt ging zwischen 1990 und 2010 somit leicht zurück. Bis zum Jahr 2030 wird trotz einer Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs ein Anstieg des jährlichen Energieverbrauchs der Binnenschifffahrt um ca. 20 % erwartet, da eine Steigerung der Transportleistung um ca. 40 % angenommen wird (entsprechend der Verkehrsprognose-VP 25). Dagegen sanken die Schadstoffemissionen seit den 1990er Jahren bis heute durch die Verjüngung der Antriebsmotoren und deren geringere spezifischen Emissionsfaktoren um bis zu 50 %. Bis zum Jahr 2030 kann eine weitere Halbierung der NOx- und PM-Emissionen erreicht werden, falls ab dem Jahr 2020 eine Einführung strengerer Emissionsgrenzwerte - in Anlehnung an die derzeit diskutierten Stufen IV und V - erfolgt.

Die neuen Datengrundlagen und Ergebnisse dieser Studie wurden in hoher Differenzierung in das **TREMODO-Modell** integriert, auch wurden die Strukturen für eine Fortschreibung und Aktualisierung geschaffen. Somit liegt für die Binnenschifffahrt in Deutschland eine fundierte Grundlage für die Berichterstattung, die ökologische Bewertung und die politische Entscheidungsfindung vor.

1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Das in TREMOD integrierte Binnenschiffahrts-Modul berechnet die Emissionen der Binnenschiffahrt derzeit aus der Summe der jährlichen Transportleistung (in Tonnenkilometern), einem spezifischen Energieverbrauchswert je Tonnenkilometer und kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren. Diese einfache Struktur erlaubt keine Berücksichtigung der Flottenzusammensetzung (Schiffstypen, Größe, Alter) und deren Änderung sowie der logistischen Abläufen (Güterstruktur, Auslastung, Leerfahrtenanteile). Weiterhin sind die verwendeten spezifischen Energie- und Emissionsfaktoren veraltet.

Im Rahmen einer unveröffentlichten Vorstudie „Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Transportleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm“ (FKZ 363 01 403 im Jahr 2011) im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden Datengrundlagen für die Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschiffahrt in TREMOD geschaffen und Informationslücken identifiziert. In einem Folgevorhaben wurden die offenen Fragen der Vorstudie soweit möglich geklärt, die benötigten Datengrundlagen erweitert und für die Emissionsberechnung in TREMOD aufbereitet. Im Wesentlichen wurden folgende Punkte bearbeitet:

- Aktualisierung des **Verkehrsmengengerüsts** um die Bezugsjahre 2010 bis 2012 und Ergänzung der Informationen zu Schiffsfahrten, Leerfahrten und der Zusammensetzung von Verbänden
- Plausibilisierung und Abgleich der **spezifischen Energieverbrauchswerte** anhand von Detailrechnungen und anhand in der Binnenschiffahrt getankter Kraftstoffmengen
- Erweiterte Auswertung von Emissions- und Flottendaten und Ableitung differenzierter **spezifischer Emissionsfaktoren**
- Durchführung einer differenzierten **Energieverbrauchs- und Emissionsberechnung für die Binnenschiffahrt in Deutschland** für die Jahre 2010-2012
- Erstellung einer **Zeitreihe** der Transportleistungen, des Energieverbrauches und der Emissionen, sowohl rückwirkend **von 1990-2010** sowie **zukünftig bis 2030**
- **Übernahme der neuen Erkenntnisse in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD**

Dieser Bericht beschreibt die neuen Datengrundlagen und Annahmen für die Berechnung des Energieverbrauches und der Emissionen der Binnenschiffahrt in Deutschland, die in dieser Studie und in der Vorstudie erarbeitet wurden.

Weiterhin wurde als Teil des Forschungsvorhabens im November 2012 ein Expertenworkshop durchgeführt. Hierbei wurden bisherige Methoden und Annahmen der Auftragnehmer mit verschiedenen Experten abgestimmt und zusätzliche Informationen und Daten gesammelt. Die Informationen zum Workshop sind im Anhang dieses Berichts enthalten.

Die Autoren danken allen Personen und Institutionen, die durch die Bereitstellung von Daten maßgeblich zu diesem Bericht beigetragen haben. Hierbei sind insbesondere die Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), die Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/Schiffseichamt (ZSUK) und die Zentralkommission für die Rheinschiffahrt (ZKR) zu nennen.

2 Verkehrsmengengerüst

Der Energieverbrauch und die Emissionen in der Binnenschifffahrt sind vor allem abhängig von der Struktur der eingesetzten Flotte (Alter, Größe, Motorisierung) und der Konfiguration der Fahrt (motorisiertes Einzelschiff, Verband). Die eingesetzte Schiffsart und –größe wird in der Güterverkehrsstatistik des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) erfasst und ist somit über die differenzierten Daten zu den Transportleistungen verfügbar (siehe Kap. 2.2). Informationen zum Alter und Motorisierung müssen aus den Bestandsstatistiken der einzelnen Länder abgeleitet werden.

2.1 Schiffsbestände

Der Bestand an Binnenschiffen in Deutschland wird von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes veröffentlicht [ELWIS 2011a]. Für den Güterverkehr relevant sind die Schiffsgattungen Güter- bzw. Tankmotorschiff, die Leichter (Schiffe ohne eigenen Antrieb) und die Schubboote.

Der Bestand der deutschen Binnenschiffsflotte hat in der Vergangenheit stark abgenommen. Die mittlere Tragfähigkeit hat sich dagegen deutlich erhöht: allein von 1992 bis 2010 um 30 %. Im gleichen Zeitraum stieg das mittlere Alter von knapp 34 Jahre auf fast 44 Jahre (siehe Abbildung 1).

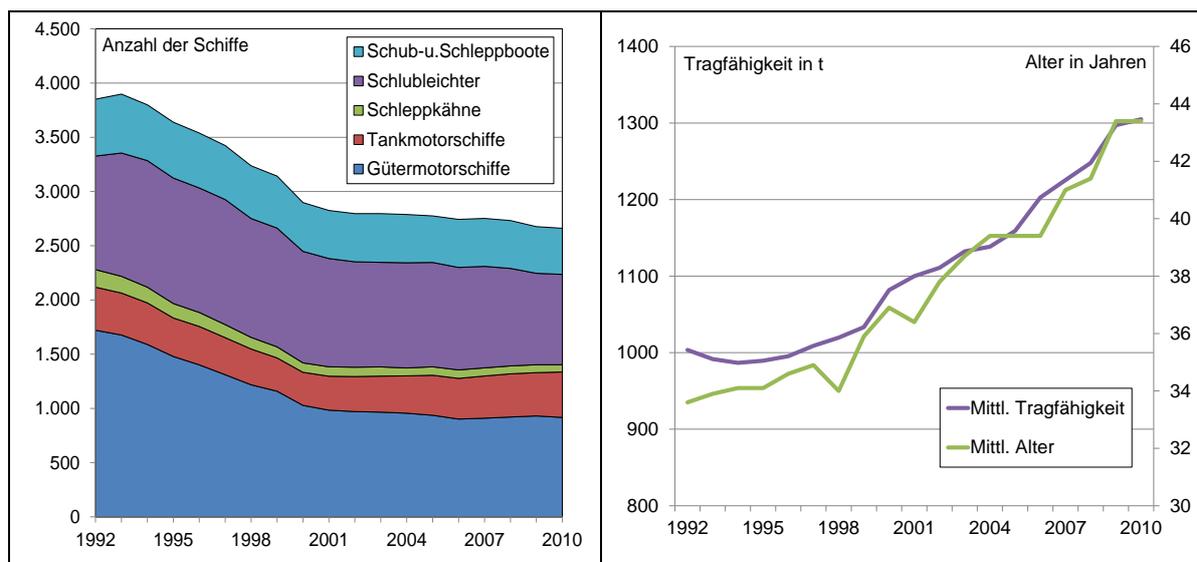


Abbildung 1: Entwicklung der Binnenschiffsflotte seit 1992 bis 2010 [ELVIS 2011a]

Die Bestände der deutschen Flotte im Jahr 2010, differenziert nach Schiffsgattung und Tragfähigkeitsklasse, sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Bestand an Binnenschiffen in Deutschland 2010 nach Schiffsgattung und Tragfähigkeit (ohne Schub- und Schleppboote)

Tragfähigkeit in t/ Schiffsgattung	<250	251- 500	501- 1.000	1.001- 1.500	1.501- 2.000	2.001- 3.000	3.001- 4.000	>4.001	Gesamt
Gütermotorschiffe	27	63	191	371	128	124	9	0	913
Tankmotorschiffe	2	1	15	140	106	138	21	0	423
Güter-/Tankschubleichter	72	306	121	99	64	151	5	3	821
Summe	101	370	327	610	298	413	35	3	2.157
Quelle: [ELWIS 2011a]									

Rund zwei Drittel der Schiffe war im Jahr 2010 über dreißig Jahre alt. Bei den Motorgüterschiffen waren es sogar über 90 % (Tabelle 2).

Tabelle 2: Bestand an Binnenschiffen in Deutschland 2010 nach Schiffsgattung und Alter

Baujahr/ Schiffsgattung	vor 1920	1920 - 1939	1940 - 1959	1960 - 1979	1980 - 1999	2000 - 2009	2010	Gesamt
Gütermotorschiffe	112	154	266	298	65	18	0	913
Tankmotorschiffe	0	1	57	188	72	90	15	423
Güter-/Tankschubleichter	13	16	22	245	502	20	3	821
Schub- und Schleppboote	27	62	61	177	91	3	0	421
Summe	152	233	406	908	730	131	18	2578
Quelle: [ELWIS 2011a]								

Da der Binnenschiffverkehr auf den deutschen Wasserstraßen überwiegend von ausländischen Flotten erbracht wird, sind zumindest die Flotten mit dem höchsten Anteil an der Transportleistung für die Emissionen der Binnenschiffe relevant. Nach einer Auswertung der IVR [IVR 2009] sind Flotten der relevanten Länder Niederlande und Belgien derzeit eher etwas älter als die deutsche Flotte (Abbildung 2). Entscheidend für das Emissionsverhalten der Binnenschiffe ist jedoch weniger das Alter der Flotte als das der Hauptantriebsmotoren, welche im Laufe der Lebensdauer ausgetauscht werden können (siehe dazu Kapitel 4.2.2)

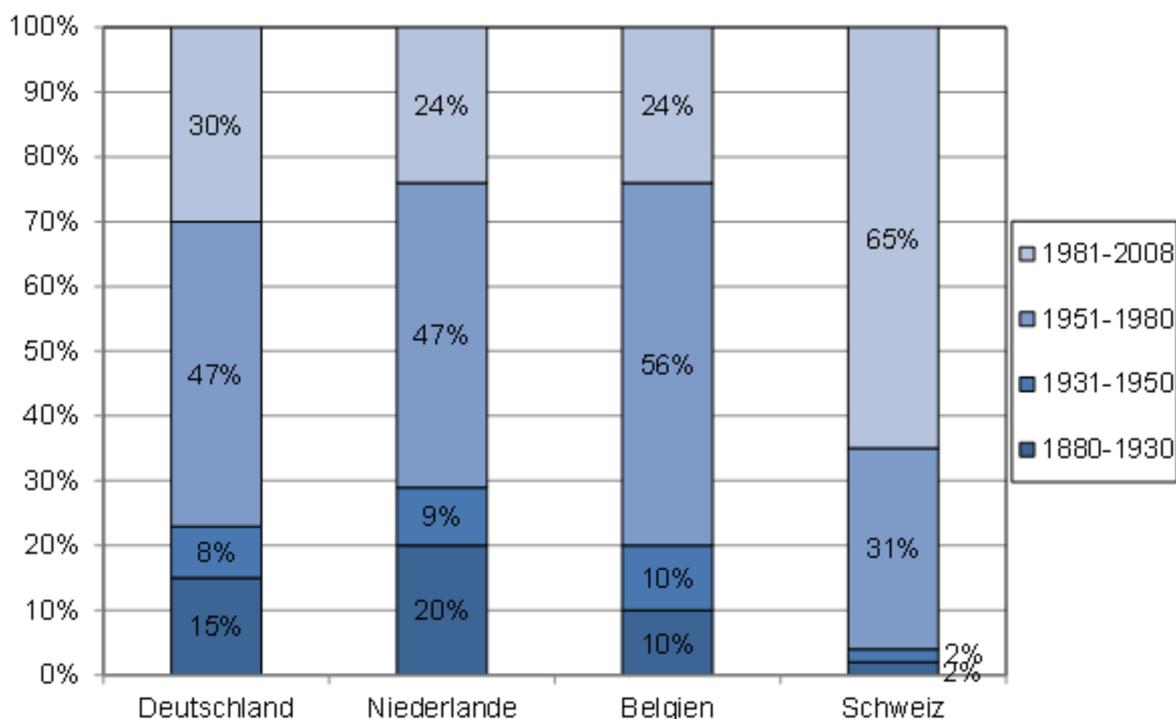


Abbildung 2: Altersstruktur der westeuropäischen Binnenflotte im Jahr 2008 [IVR 2009]

2.2 Ermittlung differenzierter Fahr- und Transportleistungen

2.2.1 Güterstatistik des statistischen Bundesamtes

Die Transportleistungen der Binnenschifffahrt werden vom statistischen Bundesamt kontinuierlich erhoben und in Monats- und Jahresberichten publiziert [DESTATIS 2013a]. Im Jahr 2009 wurde der Erhebungsbogen überarbeitet. Daher können seit 2009 neben den Transportleistungen (in Tonnenkilometern) auch die Schiffskilometer ermittelt werden.

Trotz der neuen Informationen handelt es sich um eine Statistik des Güterverkehrs mit Schwerpunkt auf die transportierten Güter und nicht auf die Transportmittel. Aus diesem Grund wird die Art und Größe des verwendeten Schiffs erfasst, sofern es sich um ein transportfähiges Schiff handelt (z.B. Gütermotorschiff und Leichter). Nicht erfasst werden Schub- und Schleppboote und die Art des Verbands (Schubverband, Koppelverband). Da die Konfiguration der Schiffsverbände für die Energie- und Emissionsberechnung entscheidend sind, müssen hier zusätzliche Annahmen getroffen werden.

In Absprache mit dem statistischen Bundesamt wurde schließlich in der Vorstudie folgende Abfrage für das Jahr 2010 in Auftrag gegeben, die nun für die Jahre 2011 und 2012 aktualisiert wurde:

Zeitlicher Rahmen:

- Berichtsjahr 2010, 2011 und 2012, Jahreswerte

Differenzierung:

- Schiffsgattung (entsprechend der DESTATIS-Systematik)
- Tragfähigkeitsklassen (in 100er Schritten: 1-100 t, 101-200 t etc.)
- Flagge (die 8-10 wichtigsten und sonstige)
- Ladungsart
- Wasserstraßen

- Flussrichtung (aufwärts, abwärts)
- Lastfahrt/Leerfahrt
- Hauptverkehrsbeziehungen

Werte:

- Anzahl der Fahrten
- Mittlere Tragfähigkeit
- Schiffskilometer
- Tonnenkilometer
- TEU-Kilometer

Bei der Erstellung der Abfrage stellte sich heraus, dass die Daten nicht in der gewünschten Differenzierung ermittelt werden können. Folgende Schwierigkeiten traten auf:

- Eine gleichzeitige Abfrage der Schiffskilometer und Tonnenkilometer in der gewünschten Differenzierung ist nicht möglich, da die Informationen in verschiedenen Datenbanken (Güterstatistik und Schiffsstatistik) vorliegen. Eine Zusammenführung der Informationen aus beiden Datenbanken ist derzeit ohne Anpassung der Datenstrukturen nicht möglich.
- Leerfahrten sind in der Schiffsstatistik erfasst, können aber derzeit nur in begrenzter Differenzierung (z.B. nicht nach Wasserstraßen) ausgewiesen werden. Außerdem kann nur grob abgeschätzt werden, wie vollständig die Leerfahrten bisher erfasst werden. Die Güterstatistik enthält grundsätzlich keine Leerfahrten.
- Die Güterstatistik, die die Grundlage der veröffentlichten Fachserie ist, erfasst keine Schiffsfahrten, sondern Sendungen. Daher enthält die Auswertung Angaben über die Anzahl der Sendungen, Sendungskilometer, Tonnenkilometer und – bei Containern – TEU-Kilometer. Die Anzahl der Sendungen und Sendungskilometer sind aber nicht identisch mit den Schiffskilometern, da eine Schiffsfahrt mehrere Sendungen enthalten kann.
- Die Differenzierung nach Flussrichtung erwies sich als sehr aufwendig. Daher wurde vereinbart, nur die Transportleistungen auf dem Rhein nach Flussrichtung aufzuteilen.

Damit liegt ein Datensatz vor, der eine weitaus bessere und differenziertere Berechnung ermöglicht als bisher, die allerdings eine ganze Reihe von zusätzlichen Annahmen und Vereinfachungen erfordert. Daher wurde mit dem Statistischen Bundesamt diskutiert, welche Verbesserungen für das Energie- und Emissionsberechnungsmodell wichtig und welche aus Datensicht mit welchem Aufwand möglich sind. Leider lassen sich die notwendigen Verbesserungen derzeit ohne eine veränderte statistische Erfassung und Datenaufbereitung nicht umsetzen. Daher wird ein Verkehrsmengengerüst für die Energie- und Emissionsberechnung auf Basis der Güterstatistik und zusätzlicher Informationen und Annahmen abgeleitet. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.2.2 Zusätzliche Annahmen

Die vom Statistischen Bundesamt vorgelegten Transportleistungsdaten für die Jahre 2010-2012 sind nicht ohne weiteres für die Energie- und Emissionsberechnung verwendbar. Daher mussten eine Reihe von Anpassungen vorgenommen und ein modifizierter Datensatz erzeugt werden. Folgende Änderungen waren notwendig:

- Zusammenfassung von Sendungen zu Schiffsfahrten
- Ergänzung der nicht erfassten Leerfahrten

- Zusammenfassung der Leichter zu Schiffsverbänden

2.2.2.1 Zusammenfassung von Sendungen zu Schiffsfahrten

Die Binnenschiffstatistik liefert keine Informationen darüber, welche Sendungen gleichzeitig auf einem Schiff transportiert wurden. Aktuelle Auswertungen des statistischen Bundesamtes für das Jahr 2012 zeigen, dass in ca. 85 % aller Schiffsabgänge und –ankünfte in einem Hafen nur ein einziges Gut transportiert wird (interne Auswertung). Für diese Fälle kann also davon ausgegangen werden, dass die Schiffskilometer den Güterkilometern identisch sind. Für die restlichen Datensätze, bei denen mehrere Güter vorkommen, sind jedoch Mehrfachzählungen bei den Schiffskilometern zu erwarten.

Da die Sendungsinformationen jedoch in sehr differenzierter Form (für jeden Wasserstraßenabschnitt nach Verkehrsrelationen, Schiffstypen und Größenklassen, Flaggen und Ladungsarten) vorliegen, können die Sendungen auf dieser Ebene zu Schiffsfahrten zusammengefasst werden. Ansatzpunkt für die Zusammenfassung ist das mittlere Gewicht jeder Sendung, die sich aus den Daten rückrechnen lässt. Weiterhin ist die maximale Tragfähigkeit des Schiffes bekannt, auf welchem die Sendung transportiert wird. Liegt das Sendungsgewicht deutlich unter der Tragfähigkeit, ist diese Sendung vermutlich ein Teil einer Schiffsladung.

Durch die Daten der Güterstatistik war es möglich festzustellen, bei welchen Ladungsarten besonders niedrige Auslastungen der Tragfähigkeit auftreten. Dies war insbesondere bei Containertransporten der Fall, weshalb angenommen wurde, dass hierbei in der Regel mehrere Sendungen pro Schiff vorkommen. Für die Zuordnung der Sendungen (bzw. Sendungskilometer) zu Schiffsfahrten (bzw. Schiffskilometer) wurden daher wie folgt vorgegangen:

- Der Transport von festem **Schüttgut und flüssigem Massengut** wird in ganzen Schiffsladungen durchgeführt (d.h. Fahrten und Ladungskilometer sind identisch mit Schiffskilometern). Die gleiche Annahme wird vereinfachend auch für **festes Stückgut** und **sonstige Güter** angenommen.
- Bei **Containersendungen** wurden Schiffsladungen unter Annahme einer durchschnittlichen Auslastung (siehe folgenden Absatz) gebündelt.

Die **massenbezogene Auslastung** des Containertransports wird dabei über folgende Größen abgeschätzt:

- die Tragfähigkeit pro Schiff (maximale Zuladung in Tonnen)
- die TEU-Kapazität pro Schiff (maximale Anzahl an Stellplätzen für 20 Fuß Container)
- die TEU-Auslastung pro Schiff (durchschnittlich genutzter Anteil der TEU-Kapazität)
- das mittlere Gewicht pro TEU

Die Tragfähigkeit und TEU-Kapazität wird anhand konkreter Schiffstypen in Tabelle 4 aufgeführt. Für die TEU-Auslastung wird nach [CE Delft 2011] ein Durchschnittswert von 85 % verwendet, hieraus ergibt sich jeweils die genutzte TEU-Kapazität. Dieser Wert wird vereinfachend als konstant angenommen, da die massenbezogene Auslastung der Schiffe sich vorwiegend über den Beladungszustand der transportierten Container (voll/leer bzw. Art der Ladung) ändert.

Bei beladenen Containern hängt das mittlere Gewicht pro TEU stark von der Güterart ab. Für Volumengüter wird eine Zuladung von 6 Tonnen, für Massengüter von 14,5 Tonnen

angenommen [IFEU et al. 2010]. Nach der Güterstatistik des statistischen Bundesamtes waren zwischen 2010 und 2012 im Durchschnitt 25-32 % aller transportierten Container leer (Tabelle 3). Die mittlere Zuladung pro TEU betrug dabei 7,5-8 Tonnen.

Tabelle 3: Merkmale des Containertransportes in Deutschland von 2010 bis 2012

	2010	2011	2012
Ladung in TEU insgesamt	2.185.583	2.188.832	2.192.498
davon leer	538.710	690.868	704.434
Anteil leer	25%	32%	32%
Ladung in Tonnen insgesamt	17.422.383	17.324.968	16.423.118
Mittlere Zuladung pro TEU	8,0	7,9	7,5
Quelle: DESTATIS (Fachserie 8, Reihe 4), eigene Berechnungen			

Zusätzlich zur Zuladung muss das Eigengewicht der Container berücksichtigt werden, welches bei einem 20-Fuß-Container 2,25 Tonnen und bei einem 40-Fuß-Container 3,78 Tonnen beträgt [GDV 2010]. Da sich diese Unterschiede nur bedingt berücksichtigen lassen, wird vereinfachend ein mittleres Gesamtgewicht von 10 Tonnen pro TEU für alle Jahre angenommen.

Die übrigen Parameter sowie die sich daraus ergebenden massenbezogenen Auslastungsgrade (ALG) werden anhand konkreter Schiffstypen in Tabelle 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass größere Schiffe aufgrund des Verhältnisses von Tragfähigkeit zur TEU-Kapazität in der Regel bessere Auslastungsgrade erzielen als kleinere Schiffstypen.

Tabelle 4: Mittlere Auslastungsgrade von Containertransporten für konkrete Schiffstypen

Schiffsbezeichnung	Tragfähigkeit in Tonnen	Kapazität pro Schiff in TEU	Mittlere Beladung pro Schiff in Tonnen	ALG
Neokemp	850	28	238	28%
Gustav Königs	1.100	36	306	28%
Rhein-Herne-Kanal Schiff	1.350	96	816	60%
Johann Welkers	1.500	81	689	46%
Kanal Schubverband	1.850	90	765	41%
Großes Rheinschiff	GMS 110	3.000	1.700	57%
	GMS 135	3.700	2.312	62%
Jowi – Klasse	5.200	470	4.000	77%
Koppelverband (GMS+Europaleichter)	6.300	440	3.740	59%
Annahmen: Mittlere TEU-Auslastung entspricht 85% der TEU-Kapazität, mittleres Gewicht pro TEU sind 10 t				
Quellen: [CE Delft 2011], [VBD 2004], eigene Berechnungen				

Anhand der Güterstatistik von DESTATIS wird ersichtlich, dass Containertransporte vorwiegend von Schiffstypen mit Tragfähigkeiten um 3.000 Tonnen durchgeführt werden (siehe Abschnitt 2.2.2.4), was in etwa dem großen Rheinschiff entspricht. Daher wird ein mittlerer Auslastungsgrad der Containertransporte von 60 % angesetzt. Dieser Wert wird für alle Bezugsjahre als konstant angenommen. Eine differenzierte Unterscheidung der

Auslastung für Container ist aufgrund der Zusammenfassung von Sendungen der Güterstatistik leider nicht möglich.

2.2.2.2 Ergänzung der nicht erfassten Leerfahrten

In der Güterstatistik des statistischen Bundesamtes werden keine Leerfahrten erfasst. Jedoch konnten im Rahmen einer Sonderauswertung der Schiffsstatistik Informationen zu den Leerfahrten gewonnen werden. So wird bei 67 % der abgegebenen Meldungen vom Schiffsführer angegeben, dass ein Hafen leer angelaufenen oder verlassen wird. Eine Ermittlung der zurückgelegten Strecke ohne Ladung ist jedoch aufgrund fehlender Angaben nur für einen Teil der Datensätze möglich. Über eine Extrapolation der erfassten Leerfahrten kann das Verhältnis der Strecke leer zu beladen mit ca. 20 % abgeschätzt werden. Da die Auswertungen der Schiffsstatistik nach Angaben des statistischen Bundesamtes derzeit aber mit hohen Unsicherheiten behaftet sind und keine weitere Differenzierung erlauben, wurden zusätzliche Quellen untersucht.

Umfangreiche Datenmengen liegen über die Schleusenerhebungen der deutschen Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) vor. Eine stichprobenartige Auswertung der wichtigsten Schleusen hinsichtlich der erfassten zusätzlichen Leerfahrten zeigt Tabelle 5. Das Verhältnis der leeren Schiffe zu den beladenen liegt je nach Untersuchungsgebiet und Bezugsjahr zwischen 36-48 % und damit deutlich höher als die erste Schätzung mithilfe der Schiffsstatistik von DESTATIS.

Tabelle 5: Leerfahrten (alle Schiffe) an verschiedenen Schleusen

Jahr	Verkehrsberichte	Untersuchte Schleusen	Anzahl passierter Schiffe		Leer/ Beladen
			Beladen	Leer	
2010	Ost	12	34.925	16.876	48%
	Mitte	6	44.639	16.589	37%
	West	9	74.210	29.768	40%
		Grenze Emmerich ¹	122.513	58.935	48%
	Südwest	4	32.285	14.284	44%
	Insgesamt	32	308.572	136.452	44%
2011	Ost	5	28.241	12.984	46%
	West	3	39.957	14.307	36%
	Südwest	3	25.946	9.413	36%
	Insgesamt	11	94.144	36.704	39%
Quelle: WSV-Berichte 2010 und 2011, eigene Berechnungen					

Eine Differenzierung bezüglich der Ladungsarten war nur über Daten des Berichts der Direktion Südwest möglich [ELWIS 2011b]. Hierbei werden die Schiffe nach Tank- und Gütermotorschiffen sowie Tank- und Güterschubleichtern unterschieden. Es zeigt sich, dass Leerfahrten insbesondere bei den Tankschiffen auftreten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Leerfahrten in der WSV Südwest, unterteilt nach Schüttgütern und flüssigen Massengütern

Jahr	Schiffskategorie	Anzahl passierter Schiffe		Leer/ Beladen
		Beladen	Leer	
2010	Gütermotorschiffe und -schubleichter	24.980	8.801	35%
	Tankmotorschiffe und -schubleichter	5.353	4.572	85%
2011	Gütermotorschiffe und -schubleichter	20.654	4.893	24%
	Tankmotorschiffe und -schubleichter	5.292	4.520	85%

Quelle: WSV-Berichte 2010 und 2011, eigene Berechnungen

Die aus den verschiedenen Statistiken getroffenen Annahmen für die zusätzlichen Leerfahrten zeigt Tabelle 7. Hierbei werden die Annahmen der Schleusenzählungen für Gütermotor- (festes Massengut) und Tankschiffe (flüssiges Massengut) weitgehend übernommen. Da für sonstige Güter keine vergleichbaren Daten verfügbar waren, werden hier keine Leerfahrten angenommen. Eine mögliche Unterschätzung der Schiffskilometer dieser Güter wird jedoch teilweise dadurch kompensiert, dass für diese keine Zusammenfassungen von Sendungen erfolgt (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Auch sind die Unsicherheiten für das Gesamtergebnis aufgrund der geringen Transportleistungen sonstiger Güter kaum relevant.

Für flüssige Massengüter wurde anhand der Güterstatistik weiterhin festgestellt, dass bei Fahrten zu Berg deutlich mehr Ladung transportiert wird als bei Fahrten zu Tal. Um dies zu berücksichtigen, wird eine Differenzierung des Leerfahrtenanteils nach Fahrtrichtung vorgenommen. Diese setzt vereinfachend voraus, dass die Schiffe bergauf und bergab jeweils die gleiche Strecke zurücklegen müssen und im Durchschnitt für beide Fahrtrichtungen zusätzlich 80 % der Strecke leer zurückgelegt wird. Je nach Bezugsjahr (2010-2012) liegt der Anteil zusätzlicher Leerfahrten zu Tal zwischen 120-150 % und zu Berg bei ca. 30 %.

Tabelle 7: Anteil zusätzlicher Leerfahrten nach Ladungsgütern und Fahrtrichtung

Güterart	Verhältnis der Schiffskilometer leer/voll
Flüssiges Massengut	80%*
Festes Schüttgut	30%
Sonstige Güter	0%

* wird in TREMOD weiterhin nach Fahrtrichtung unterschieden
Quelle: Verkehrsberichte der WSV, Eigene Annahmen

2.2.2.3 Zusammenfassung der Leichter zu Schiffsverbänden

In der Statistik von DESTATIS sind keine Angaben zu den Schiffsfahrten in Schub- oder anderen Verbänden enthalten. Es sind daher Annahmen zu treffen, wie die Leichter zu Verbänden zusammengeschlossen werden.

Statistische Informationen zu den Anteilen verschiedener Verbände lagen zum Zeitpunkt der Auswertung nicht vor. Allerdings kann über die Klassifizierung der Wasserstraßen ermittelt werden, welche Verbände auf welcher Wasserstraße überhaupt zulässig sind [ELWIS 2011c,d]. So sind auf den Gewässern der Klassen I bis Va nur Schubverbände

mit einem Leichter möglich. Bei Vb und VIa sind es zwei Leichter, bei VIb vier Leichter und bei VIc sechs Leichter.

Mit diesen Informationen wurden Anteile geschätzt, die in Tabelle 8 zusammengefasst sind.

Tabelle 8: Anteil der Leichter in verschiedenen Schubverbänden

Gewässerklasse/ Schiffstyp	I	II	III	IV	Va	Vb	VIa	VIb	VIc
Güterleichter									
Verband 1x1	100%	100%	100%	100%	100%	50%	30%	20%	10%
Verband 1x2						50%	70%	50%	30%
Verband 2x2								30%	20%
Verband 2x3									40%
Gesamt	100%								
Tankleichter									
Tank-Verband 1x1	100%	100%	100%	100%	100%	50%	30%	20%	10%
Tank-Verband 1x2						50%	70%	50%	30%
Tank-Verband 2x2								30%	20%
Tank-Verband 2x3									40%
Gesamt	100%								
Quelle: [ELWIS 2011c,d], eigene Annahmen									

Zusätzlich zu dieser Vorgehensweise konnten vor allem qualitative Informationen verschiedener Experten im Rahmen des Workshops zusammengestellt werden. Hierbei wurde bestätigt, dass größere Leichterformationen (mit bis zu sechs Leichtern) insbesondere für Erztransporte auf dem Rhein genutzt werden.

Auch wurde die Bedeutung von Koppelverbänden, also die Kombination aus einem Motorfrachtschiff und einem oder mehreren Leichtern, hervorgehoben. Den Einschätzungen verschiedener Experten zufolge können über diese Verbandsart sehr niedrige spezifische Energieverbrauchswerte erreicht werden. Aufgrund der geringen Datenlage zur Verkehrsleistung sowie zum spezifischen Energieverbrauch konnten Koppelverbände bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden.

2.2.2.4 Ergebnis der Anpassungen

Mit den beschriebenen Annahmen wurden die Verkehrsdaten von DETSATIS so aufbereitet, dass sie mit geeigneten Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren verknüpft werden können. Tabelle 9 zeigt zusammengefasst die Transportleistungsdaten von DESTATIS nach Ladungsarten und Schiffsarten. Die Angaben beziehen sich hierbei auf die Gütersendungen im Jahr 2010.

Tabelle 9: Verkehrsdaten des Binnenschiffsverkehrs in Deutschland für 2010 - DESTATIS

Nach Ladungsart	Sendungs-km in 1000	Tonnen-km in Mio.	mittlere Tragf. in t	Ausnutzung der mittl. Tragf.
Flüssiges Massengut	8.187	13.564	2.136	78%
Festes Schüttgut	25.762	35.689	1.855	75%
Stückgut	4.884	4.207	1.790	48%
Container	26.821	6.104	3.139	7%
sonstiges	1.965	2.715	2.005	69%
Gesamt	67.618	62.278		
Nach Schiffsart	Sendungs-km in 1000	Tonnen-km in Mio.	mittlere Tragf. in t	Ausnutzung der mittl. Tragf.
Gütermotorschiff	43.787	39.557	2.310	39%
Tankmotorschiff	7.984	13.180	2.140	77%
Container	7.004	1.432	3.855	5%
Güterleichter	8.583	7.644	1.911	47%
Tankleichter	203	384	1.975	96%
Sonstiges Güterschiff	58	82	1.657	85%
Gesamt	67.618	62.278		
Anmerkung: Ausnutzung der mittleren Tragfähigkeit = Gewichtsanteil der mittleren Sendung bezogen auf die mittlere Tragfähigkeit pro Ladungs-/Schiffsart				
Quelle: DESTATIS, Eigene Berechnungen				

Tabelle 10 zeigt die aufgrund der beschriebenen Annahmen abgeleiteten Transportleistungen für die Schiffsfahrten einschließlich der Leerfahrten in gleicher Differenzierung.

Folgende Tendenzen lassen sich erkennen:

- Durch die Berücksichtigung der Leerfahrten sind die Schiffskilometer bei flüssigen Massengütern und festen Schüttgütern höher als die Sendungskilometer.
- Beim Containertransport werden mehrere Sendungen auf einem Schiff transportiert, deshalb werden weniger Schiffskilometer erbracht als Sendungskilometer.
- Durch die Zusammenfassung der Leichter zu Verbänden sinkt die Menge der Schiffskilometer für die Schiffsverbände gegenüber denen der einzelnen Leichter.

Tabelle 10: Verkehrsdaten des Binnenschiffsverkehrs in Deutschland für 2010 - aufbereitet

Nach Ladungsart	Schiffs-km in 1000	Tonnen-km in Mio.	mittlere Tragf. in t	ALG beladen	zusätzl. Leerfahrt	ALG beladen+leer
Flüssiges Massengut	14.561	13.564	2.164	77%	80%	43%
Festes Schüttgut	31.399	35.689	1.978	75%	30%	57%
Stückgut	4.744	4.207	1.843	48%	0%	48%
Container	3.397	6.104	2.994	60%	0%	60%
Sonstiges	1.900	2.715	2.073	69%	0%	69%
Gesamt	56.001	62.278				
Nach Schiffstyp	Schiffs-km in 1000	Tonnen-km in Mio.	mittlere Tragf. in t			ALG beladen+leer
Gütermotorschiff	36.653	39.557	1.904			57%
Tankmotorschiff	14.369	13.180	2.142			43%
Container	753	1432	3.169			60%
Güterverband	3.969	7.644	3.194			60%
Tankverband	192	384	3.816			52%
Sonstiges Güterschiff	64	82	1.655			77%
Gesamt	56.001	62.278				
Anmerkung: ALG: Auslastungsgrad: Auslastung der maximalen Nutzlastkapazität Quelle: [DESTATIS 2013b], Eigene Berechnungen						

3 Spezifische Energieverbrauchswerte

In den folgenden Unterkapiteln werden die in der Vorstudie ermittelten Dieserverbrauchswerte für Binnenschiffe mit Ergebnissen anderer Studien auf aggregierter Ebene (siehe Kapitel 3.2) sowie auf Flussabschnittsebene (siehe Kapitel 3.3) verglichen. Insbesondere der Vergleich auf Flussabschnittsebene zeigt einen Anpassungsbedarf der Methodik der Vorstudie. Die neue Vorgehensweise und die Neuberechneten Energieverbrauchswerte werden in Kapitel 3.4 vorgestellt. Zum besseren Verständnis wird nochmals die Vorgehensweise der Vorstudie in Kapitel 3.1 kurz vorgestellt.

3.1 Vorgehensweise in der Vorstudie

Grundsätzlich ist die Berechnung des Energieverbrauchs der Binnenschifffahrt auf zwei unterschiedlichen Wegen möglich. Beim ersten Weg wird der über Energiestatistiken erfasste Dieserverbrauch der Binnenschifffahrt durch die insgesamt von Binnenschiffen erbrachte Verkehrs- bzw. Transportleistung dividiert. Dieser auch als Top-down-Ansatz bezeichnete Wege liegt beispielsweise dem derzeitigen TREMOD-Modell zugrunde [IFEU 2012]. Beim zweiten Weg, der als Bottom-up-Ansatz bezeichnet wird, wird der spezifische Energieverbrauch pro Schiffskilometer oder Tonnenkilometer möglichst differenziert nach Schiffsklassen, Schiffgrößen oder Flusstypen ermittelt und mit den jeweiligen Verkehrsgrößen (Schiffskilometer bzw. Tonnenkilometer) ausmultipliziert. Der Gesamtenergieverbrauch aller Binnenschiffe ist damit das Ergebnis der Berechnungen.

In Rahmen der Vorstudie „Aktualisierung der Emissionsfaktoren und Transportleistungen von Binnenschiffen und Übertragung ins TREMOD-Programm“ (FKZ 363 01 403) im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde bereits gezeigt, dass ein Top-Down-Ansatz selbst bei Ausweitung des Bezugsraum auf alle Rheinanliegerstaaten und Frankreich für die Berechnung des Energieverbrauchs der Binnenschifffahrt nur bedingt sinnvoll anwendbar ist. Auch eine Aktualisierung und Erweiterung dieser Analysen belegen diese Aussage (siehe Exkurs).

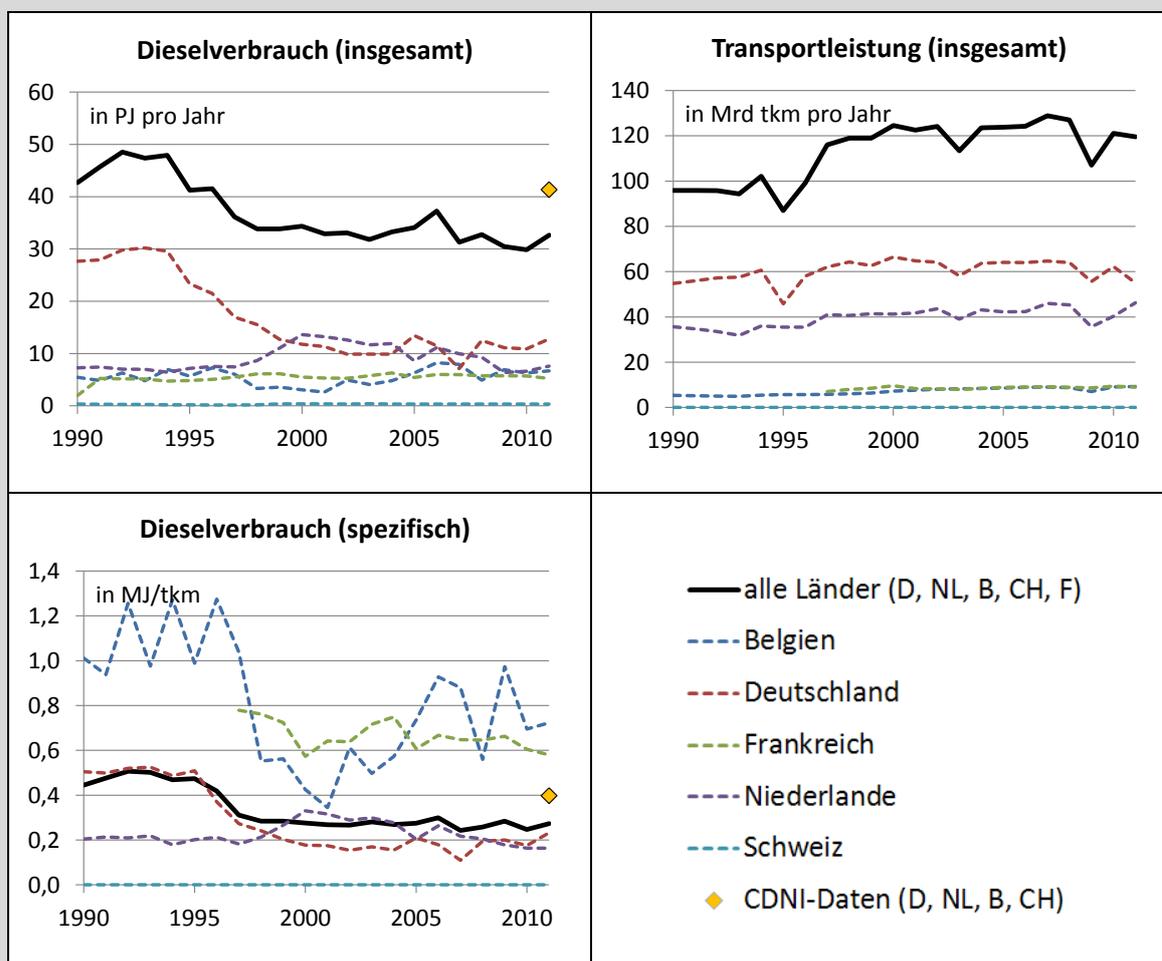
Exkurs: Top-Down-Analyse des Energieverbrauchs der Binnenschifffahrt

Da der Güterverkehr mit Binnenschiffen oftmals grenzüberschreitend erfolgt, stimmen die in einem Land getankten Dieselmengen und die in einem Land erbrachte Verkehrs- bzw. Transportleistung nicht zwangsläufig überein. Aus diesem Grund wurden bereits in der Vorstudie die für die Binnenschifffahrt in Europa wichtigen Länder Deutschland, Niederlande, Belgien, Frankreich und Schweiz analysiert. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs, der Transportleistung sowie des spezifischen Energieverbrauchs pro tkm der einzelnen Länder sowie der Summe aller Länder für den Zeitraum von 1990 bis 2011 auf Basis von EUROSTAT-Daten [EUROSTAT 2013a/b].

Ergänzt wurden die Daten von EUROSTAT um Auswertungen basierend auf Daten des Straßburger Abfallübereinkommens (CDNI). Im Rahmen des CDNI wird seit 1996 in der Binnenschifffahrt eine Abfallentsorgungsgebühr für öl- und fetthaltige Schiffsbetriebsabfälle, z.B. Altöl und Bilgenwasser, erhoben. Diese wird pauschal mit 7,5 € pro 1.000 Liter Dieselmotoren berechnet [ZKR 2011]. Durch eine Voranalyse der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt konnten Erhebungen über die CDNI-Gebühren gewonnen werden, die Rückschlüsse über den Treibstoffverbrauch zulassen. So wurden im Jahr 2011 in den Ländern Deutschland, Niederlande, Belgien und der Schweiz ein Betrag von ca. 10,3 Mio. € erhoben, welcher etwa einem energetischen Verbrauch von 49.000 PJ entspricht¹. Im Rahmen der ZKR-Auswertung wurde von diesem Verbrauch weiter-

¹ Zugrunde gelegt wurde eine Dichte von 0,832 kg/l und ein Heizwert von 42,96 MJ/kg für Diesel nach den Richtwerten der AG Energiebilanzen

hin ein geschätzter Anteil der Fahrgastschiffahrt von 15 % abgezogen, woraus sich für die Güterschiffahrt ein Durchschnittsverbrauch von 0,011 l/tkm für das Jahr 2011 ergibt [ZKR 2013]. Dieser Top-down ermittelte Wert ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt.



Quellen: [EUROSTAT 2013a/b], [ZKR], eigene Berechnungen

Abbildung 3: Vergleich des TOP-Down Energieverbrauchs anhand nationaler Energiebilanzen und Erhebungen im Rahmen des CDNI

Insgesamt zeigt diese Auswertung:

- Der absolute Energieverbrauch der Binnenschiffe in Deutschland nimmt im Betrachtungszeitraum vor allem ab 1993 deutlich ab. Diese Tendenz spiegelt sich auch für die Summe der betrachteten Länder wider, obwohl der Dieselabsatz der Niederlande im selben Zeitraum leicht zunahm.
- Da die Transportleistung der betrachteten Länder gleich bleibt oder gar ansteigt, kommt es für den Durchschnitt aller betrachteten Länder zu einer Abnahme des spezifischen Energieverbrauchs von 0,45 MJ/tkm im Jahr 1990 auf 0,27 MJ/tkm im Jahr 2011. Der Wert für das Jahr 2011 entspricht rund 6,4 g Diesel/tkm.
- Der von der ZKR abgeschätzte Wert auf Basis der CDNI-Erhebungen liegt hingegen bei 0,4 MJ/tkm oder 9,4 g/tkm und würde damit kaum einen Rückgang des spezifischen Verbrauchs belegen.

Der festgestellte Rückgang des spezifischen Energieverbrauchs der Binnenschiffahrt der betrachteten Länder von rund 40 % im Zeitraum von 1990 bis 2011 erscheint nicht wirklich plausibel. Die

Entwicklung deutet an, dass neben Effizienzverbesserungen der Binnenschiffe veränderte Abgrenzungen in der Energiestatistik zu dieser Entwicklung beigetragen haben. Dies wird auch dadurch ersichtlich, dass Mitte der 1990er Jahre der starke Rückgang des Energieverbrauchs mit einem starken Anstieg der Transportleistung einherging. Als Resultat nahm in diesem Zeitraum der spezifische Dieselerverbrauch pro Tonnenkilometer überproportional ab. Aufgrund dieser Datenunplausibilitäten wurde im Rahmen der Vorstudie ein Bottom-up-Ansatz entwickelt, der im Rahmen dieses Vorhabens weiterentwickelt wurde. Die aktualisierten Analysen zeigen aber klar, dass ein alleiniger Top-down-Ansatz zur Berechnung des Energieverbrauchs der Binnenschifffahrt ungeeignet ist und lediglich zur Absicherung der Ergebnisse einer Bottom-up-Analyse herangezogen werden sollte.

Auf der anderen Seite erfordert die Anwendung eines Bottom-up-Ansatzes, der den Energieverbrauch der Binnenschifffahrt als Summe des Energieverbrauchs einzelner Schiffe bzw. Schiffsklassen berechnen will, detaillierte Informationen. Im Prinzip berechnet sich der Energieverbrauch von Binnenschiffen (Hauptmotor ohne Hilfsmotoren) nach folgender Grundformel [Planco 2007; VBD 2001 und 2004]:

$$EV = D \times \frac{P_{Motor} \times NG_{Motor} \times EV_{Motorf}}{v_{Wasser} \pm v_{Ström}}$$

EV	= Energie-/Kraftstoffverbrauch des Binnenschiffes für die Strecke D in l
D	= Zurückgelegte Strecke mit dem Binnenschiff in km
P_{Motor}	= Durchschnittliche Leistung des Motors in der Schiffsklassen in kW
NG_{Motor}	= Nutzungsgrad der Motorleistung bei gegebener Abladetiefe, Gewässertiefe und Geschwindigkeit gegenüber Wasser
EV_{Motor}	= Spezifischer Dieselerverbrauch des Motors in l/kWh.
v_{Wasser}	= Geschwindigkeit gegenüber Wasser in km/h
$v_{Ström}$	= Geschwindigkeit der Flussströmung; bei Bergfahrten muss $v_{Ström}$ von v_{Wasser} abgezogen, bei Talfahrten muss $v_{Ström}$ zu v_{Wasser} hinzuaddiert werden

Die Kenngrößen „Leistung des Motors“ (P_{Motor}), „spezifischer Energieverbrauch des Motors“ (EV_{Motor}) sowie „Geschwindigkeit der Flussströmung“ ($v_{Ström}$) sind verhältnismäßig leicht zu ermittelnde Werte. Die Leistung des Motors ergibt sich über den Schiffstyp (z. B. Motorschiff oder Schubverband) bzw. die Schiffgröße und damit über die mögliche Nutzlast der Schiffe (als Tragfähigkeit bezeichnet). Der spezifische Energieverbrauch des Motors EV_{Motor} ist ein weitgehend konstanter Wert und liegt bei rund 0,2 kg Diesel pro kWh Motorleistung [TNO 2010; Planco 2007; VBD 2004]. Die Fließgeschwindigkeit hängt vom betrachteten Fluss ab, liegt aber in der Regel für die Berechnung vor (für den Rhein liegt sie beispielsweise bei 6 km/h) [VBD 2001 und 2004].

Schwieriger zu ermitteln sind hingegen die Kenngrößen „prozentualer Nutzungsgrad des Motors“ (NG_{Motor}) sowie die „Fahrgeschwindigkeit der Schiffe gegenüber dem Wasser“ (v_{Wasser}). Der Nutzungsgrad der verfügbaren Motorleistung hängt vom Schiffstyp, vom Tiefgang des Schiffes und damit vom Beladungsgrad des Schiffes (auch als Abladetiefe²

² Die Abladetiefe bezeichnet den Tiefgang eines Schiffes im Ruhezustand, der einem bestimmten Beladungszustand entspricht. Der Tiefgang wird dabei von der Ebene des Wasserspiegels bis zum tiefsten Punkt des Schiffes gemessen.

bezeichnet), von der Tiefe der Wasserstraße und der Geschwindigkeit des Schiffes gegenüber dem Wasser ab. Die Fahrgeschwindigkeit der Binnenschiffe gegenüber Wasser wiederum hängt ab vom Schiffstyp, vom Beladungszustand (Abladetiefe) sowie vom Gewässertyp ab. Bei stauregulierten Flüssen und Kanälen ist beispielsweise die Maximalgeschwindigkeit der Binnenschiffe auf 12 bzw. 11 km/h begrenzt [Planco 2007; VBD 2001 und 2004]. Bei Flüssen wird die Geschwindigkeit gegenüber Wasser und damit der Energieverbrauch der Binnenschiffe davon beeinflusst, ob man flussaufwärts (Bergfahrt) oder flussabwärts (Talfahrt) fährt. Grundsätzlich besteht also eine Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Nutzungsgrad der Motorleistung. Je langsamer Schiffe fahren, desto geringer ist die benötigte Motorleistung und damit der Dieselverbrauch der Schiffe (siehe Abbildung 4).

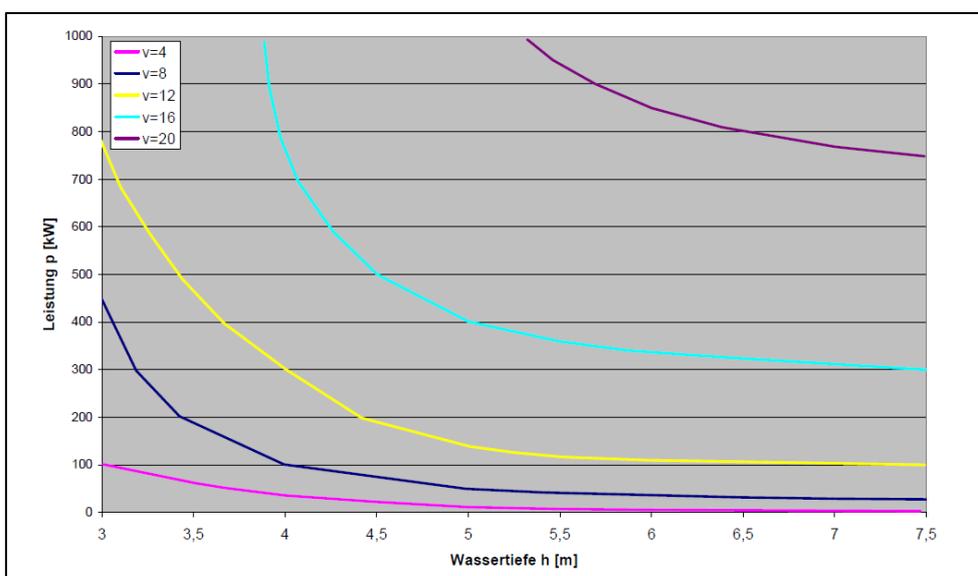


Abbildung 4: Abhängigkeit der benötigten Leistung eines Großmotorschiffes (GMS) in Abhängigkeit der Wassertiefe und der Geschwindigkeit gegenüber Wasser bei 2,5 Meter Abladetiefe [PLANCO 2007]

Um detailliert mit einem Bottom-up-Ansatz den Energieverbrauch von Binnenschiffen berechnen zu können, müssen somit folgende Informationen vorliegen zu:

- Schiffstyp (Gütermotorschiff, Tankmotorschiff, Containerschiff, Schubverband, sonstige Schiffe),
- Schiffsgröße (Motorleistung und Kapazität bzw. mittlerer Tragfähigkeit),
- Beladung des Schiffes (Nutzlast und damit bedingt die Abladetiefe),
- Geometrie der Wasserstraße (Breite und vor allem Tiefe),
- Strömungsgeschwindigkeit des Flusses sowie
- Geschwindigkeit des Schiffes gegenüber dem Wasser (damit meist indirekt davon abhängig, ob das Schiff zu Berg und zu Tal fährt).

Diese detaillierten Daten stehen aber im günstigsten Fall nur für einzelne Flussabschnitte zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde in der Vorstudie ein vereinfachter Bottom-up-Ansatz entwickelt, bei dem der Energieverbrauch der Binnenschiffe nach der oben stehenden Formel vereinfacht für verschiedene Schiffstypen, Tragfähigkeitsklassen, Bela-

dungen und Wasserstraßentypen (z.B. frei fließender Fluss, Kanal) berechnet wurde. Hierzu wurden durchschnittliche Werte für die Motorauslastung in Abhängigkeit von der Beladung und der Wasserstraße verwendet. Konkret wurde angenommen, dass die Binnenschiffe in Abhängigkeit ihrer Beladung und Schiffsgröße die maximale mögliche Geschwindigkeit fahren (ein GMS beispielsweise 16,4 km/h voll beladen und 20,4 km/h leer; auf Kanälen generell 11 km/h). Die Nutzungsgrade der Motorleistung wurden dazu passend pauschal in Abhängigkeit des Beladungsgrades der Schiffe und des Gewässertyps ermittelt (siehe Tabelle 11) [VBD 2004; Planco 2007]. Dabei wurden vereinfachend staugeregelte Flüsse den Kanälen zugeordnet. Zusätzlich wurden typische Motorleistungen pro Tragfähigkeitsklasse abgeleitet. Dabei wurde zwischen Gütermotorschiffen sowie Schubverbänden unterschieden (Beispiele: 1.400 kW für ein GMS mit rund 3.000 t Tragfähigkeit, 3.700 kW für einen Schubverband mit einer Tragfähigkeit von 11.200 t).

Tabelle 11: Nutzungsgrade NG_{Motor} der insgesamt vorhandenen Motorleistung der Binnenschiffe in Abhängigkeit von der Beladung und dem Gewässertyp

Gewässertyp	Leerfahrt (0 % Auslastung)	Volllast (100 % Auslastung)
	%	%
Freifließender Fluss	70 %	95 %
Kanal/staugeregelter Fluss ¹⁾	20 %	45 %

¹⁾ Staugeregelte Flüsse wurden den Kanälen zugeordnet. In der Praxis liegen die Nutzungsgrade der Motorleistung für staugeregelte Flüsse über denen der Kanäle.
Quellen: [VBD 2004] (Leerfahrt); [Planco 2007] (Lastfahrt); eigene Zusammenstellung.

Unter Verwendung dieser Daten konnte im Rahmen der Vorstudie dann für jede beliebige Tragfähigkeitsklasse differenziert

- nach den beiden Gewässertypen „freifließender Fluss“ sowie „Kanal/staugeregelter Fluss“
- nach den beiden Beladungsgraden „0 %“ (leer) und „100 %“ (voll beladen) sowie
- nach Gütermotorschiffen und Schubverbänden

der Dieserverbrauch pro Schiffskilometer ermittelt werden. Für freifließende Flüsse wurde vereinfachend der Energieverbrauch zwischen Berg- und Talfahrt gemittelt; diese Werte wurden dann unabhängig von der Fließrichtung des Flusses verwendet. Als Fließgeschwindigkeit wurde generell 6 km/h unterstellt [VBD 2001 und 2004].

Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt Abbildung 5. Da für jede Tragfähigkeitsklasse eine maximale Motorleistung zugeordnet ist, ergeben sich stetige Kurvenverläufe für den Dieserverbrauch des Hauptmotors des Binnenschiffes in Abhängigkeit der Tragfähigkeitsklasse. Diese Kurven entsprechen Polynomen 2. Grades ($a x^2 + b x + c$), wobei x für die Tragfähigkeit in t steht. Für Schiffe unterhalb der Tragfähigkeitsklasse von 300 t wurde ein konstanter Dieserverbrauch der Binnenschiffe unterstellt (siehe Abbildung 5). Die Energieverbrauchsdaten für Gütermotorschiffe wurden als repräsentativ für Tank- und Containerschiffe sowie für Schiffe zum Transport sonstiger Güter angesehen. Die Daten für Schubverbände wurden sowohl für Schiffe zum Transport fester wie auch flüssiger Güter verwendet. Grundsätzlich ergibt sich der Verbrauch eines Binnenschiffes durch lineare Interpolation der Werte für 0 % und 100 % Auslastung entsprechend der realen Auslastung der Schiffe.

Die oben aufgeführte Formel und damit die Verbrauchsdaten der Abbildung 5 beziehen sich ausschließlich auf den Hauptmotor des Binnenschiffes. Unberücksichtigt sind dabei der Energieverbrauch von Hilfsmotoren und Nebenaggregaten zur Stromerzeugung an Bord oder zum Manövrieren der Schiffe in Häfen oder in Schleusen. Auch der von Binnenschiffen benötigte Schmierstoffbedarf ist dabei noch nicht berücksichtigt. Analysen im Rahmen der Vorstudie haben gezeigt, dass im Mittel von einem Zusatzverbrauch der Hilfsmotoren von 5 % bezogen auf den Brennstoffverbrauch der Hauptaggregate ausgegangen werden kann. In der Vorstudie wurde dieser Wert daher pauschal verwendet.

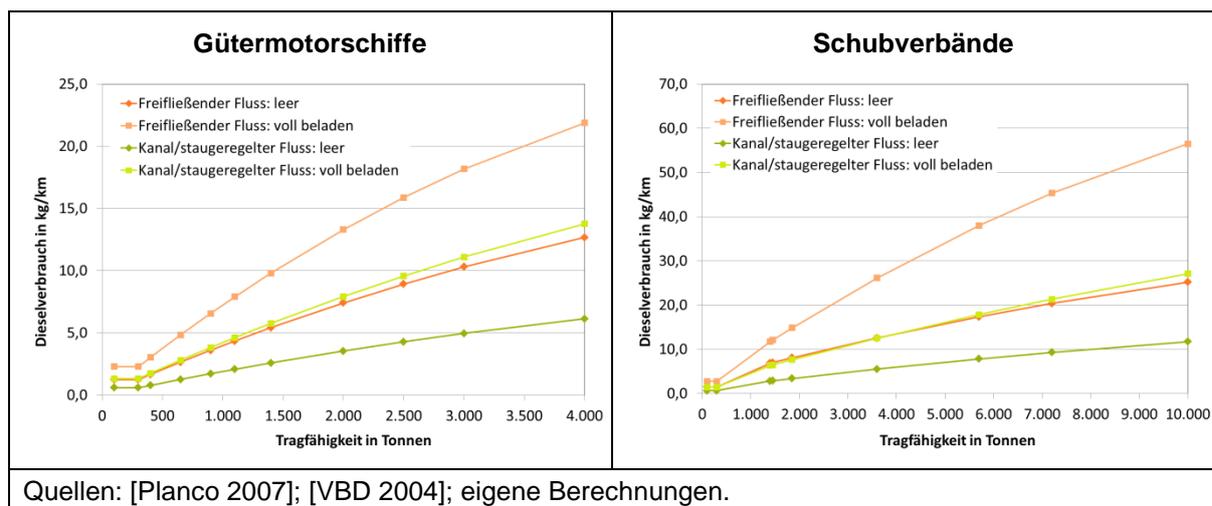


Abbildung 5: Dieselverbrauch des Hauptmotors für Gütermotorschiffe und Schubverbände in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und des Gewässertyps entsprechend der Analysen der Vorstudie

3.2 Vergleich der Ergebnisse der Vorstudie mit Messwerten und Ergebnissen anderer Studien

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde im November 2012 ein Expertenworkshop mit Fachleuten aus der Binnenschifffahrt durchgeführt, um unter anderem auch die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Vorstudie einer kritischen Würdigung zu unterziehen (siehe die Zusammenfassung der Ergebnisse des Workshops im Anhang). Im Rahmen dieses Workshops hat die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) eine Gegenüberstellung der Dieselverbrauchswerte für Binnenschiffe, basierend auf der Vorstudie mit real gemessenen Dieselverbräuchen sowie mit Ergebnissen anderer Studien vorgestellt [ZKR 2012]. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs, in dem zusätzlich der von der ZKR auf Basis der Daten des Straßburger Abfallübereinkommens (CDNI) ermittelte Energieverbrauch für die Rheinschifffahrt für das Jahr 2011 integriert ist [ZKR 2013].

Diese Gegenüberstellung legt die Vermutung nahe, dass die für Binnenschiffe in der Vorstudie ermittelten Energieverbrauchswerte zwar realistischer sind als die anderer Studien (z.B. EcoTransIT, Marco Polo), gleichzeitig aber immer noch deutlich über den gemessenen Werten oder den Berechnungsergebnisse von Planco liegen [Planco 2007] und damit den Energieverbrauch der Binnenschiffe systematisch überschätzen. Die Top-down-Analyse der Daten des Straßburger Abfallübereinkommens (CDNI) deuten aber hingegen an, dass die Energieverbrauchswerte der Vorstudie durchaus in der korrekten Größenordnung liegen (siehe Abbildung 6).

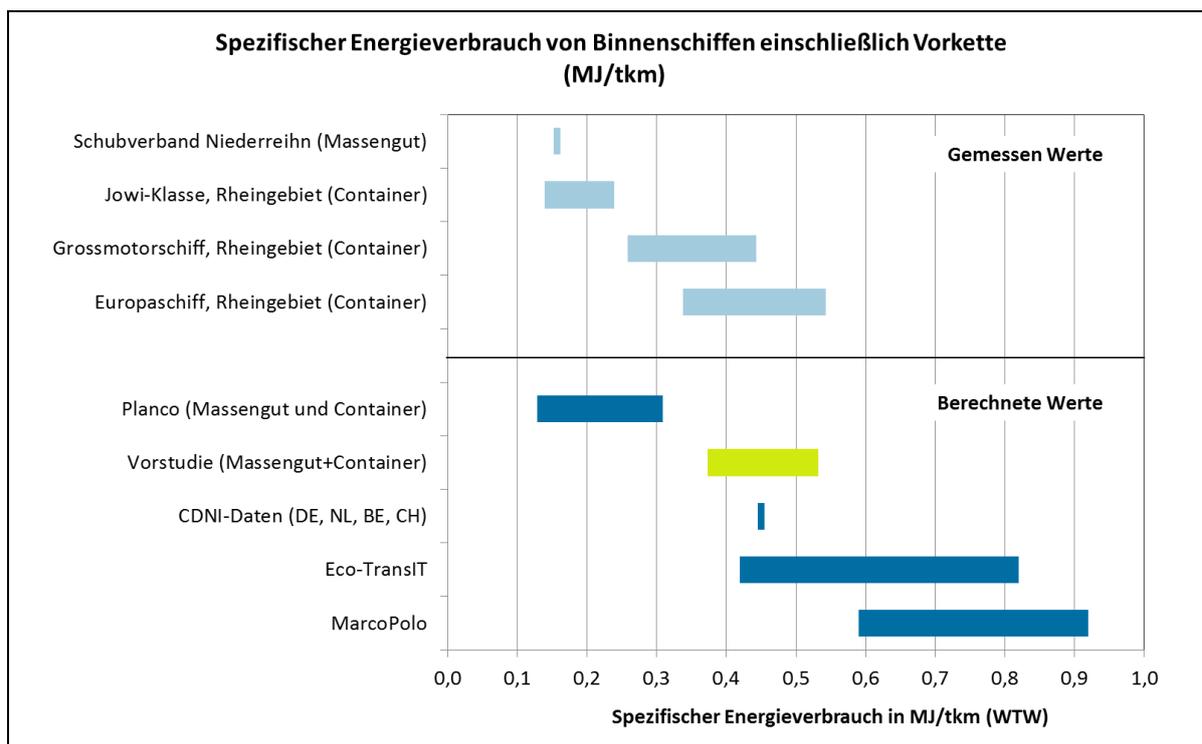


Abbildung 6: Vergleich von Messwerten und Ergebnisse anderer Studien mit den Energieverbrauchswerten für Binnenschiffe der Vorstudie [ZKR 2012; eigene Darstellung]

Die Unterschiede der Energieverbrauchswerte in Abbildung 6 sind allerdings durchaus erklärbar und sprechen daher nicht gegen die Ergebnisse der Vorstudie. Bei dem Vergleich sind nämlich folgende Punkte zu beachten:

- Die in der Abbildung dargestellten Energieverbrauchswerte sind auf die Einheit Tonnenkilometer (tkm) bezogen. Das bedeutet, dass neben dem Verbrauch pro Schiffskilometer auch die Auslastung der Schiffe eingeht. Die dargestellten Verbrauchswerte der Vorstudie basieren auf durchschnittliche Auslastungen für Deutschland, während alle Messwerte sowie die Ergebnisse von Planco sich auf Beispielstrecken mit teilweise höheren Auslastungen beziehen. Zwangsläufig können sich damit niedrigere Energieverbrauchswerte pro tkm ergeben. Werden nach der Vorstudien-Methode die Energieverbräuche der Binnenschiffe einerseits für Vollauslastungen, andererseits für die von Planco für die Beispielrelationen unterstellten Auslastungen neu berechnet, ergeben sich vergleichbare Energieverbrauchswerte (siehe Abbildung 7).
- Die in der Abbildung 6 dargestellten Bandbreiten der Messwerte bzw. Studienergebnisse sind nicht mit der dargestellten Bandbreite der Vorstudienenergebnisse vergleichbar. Die für die Vorstudie dargestellte Bandbreite bezieht sich auf die Streuung der Ergebnisse der Mittelwerte pro Schiffstyp (Gütermotorschiff, Containerschiff etc.). Die Streuungen der dargestellten Messwerte für die drei dargestellten Containerschiffstypen ergeben sich hingegen aufgrund der Berücksichtigung der Energieverbrauchswerte für eine Berg- und eine Talfahrt. Streng genommen dürfte nur der Mittelwert von Berg- und Talfahrt mit den Energieverbrauchswerten der Vorstudie verglichen werden (sprich die Mitte des Streubalkens). In diesem Fall wären mit Ausnahme der Jowi-Schiffsklasse die Werte mit denen der Vorstudie vergleichbar.

- Weiterhin sind die unterstellten Annahmen und Randbedingungen zu beachten. Die Energieverbrauchswerte der Planco-Studie gehen für die untersuchten Beispielsrelationen von einer möglichst wirtschaftlichen und damit energieeffizienten Fahrweise aus [Planco 2007]. Das bedeutet insbesondere, dass die Schiffe nicht die maximal mögliche Geschwindigkeit fahren, sondern beispielsweise flussabwärts die Strömungsgeschwindigkeit in einem möglichst starken Maße nutzen. Die Geschwindigkeit gegenüber Wasser und damit der Energieverbrauch der Binnenschiffe sind damit gering (siehe nächstes Unterkapitel). Den Werten der Vorstudie liegt eine derartige Annahme nicht zugrunde, weshalb sich selbst unter Berücksichtigung der höheren Auslastungen von Planco auf den Beispielsrelationen tendenziell höhere Energieverbrauchswerte ergeben (siehe Abbildung 7).

Vergleicht man somit die Ergebnisse der Vorstudie mit den Messwerten und den Ergebnissen der anderen Studien unter Beachtung gleicher Systemgrenzen und Auslastungen, stimmen die Energieverbrauchswerte der Binnenschiffe der verschiedenen Quellen weitgehend überein. Nichtsdestotrotz wurde von den Experten des Workshops angeregt, die Energieverbrauchswerte nochmals einem detaillierteren Vergleich auf Flussabschnittsebene zu unterziehen. Unter anderem wurde angemerkt, dass die für die Binnenschiffe angenommenen Geschwindigkeiten gegenüber Wasser und damit die unterstellten Nutzungsgrade der Motorleistung (siehe Tabelle 11) tendenziell zu hoch seien. Aus diesem Grund werden im folgenden Unterkapitel detailliert die in der Vorstudie ermittelten Dieselverbrauchswerte konkret für Flussabschnitte ermittelten Energieverbräuchen gegenübergestellt.

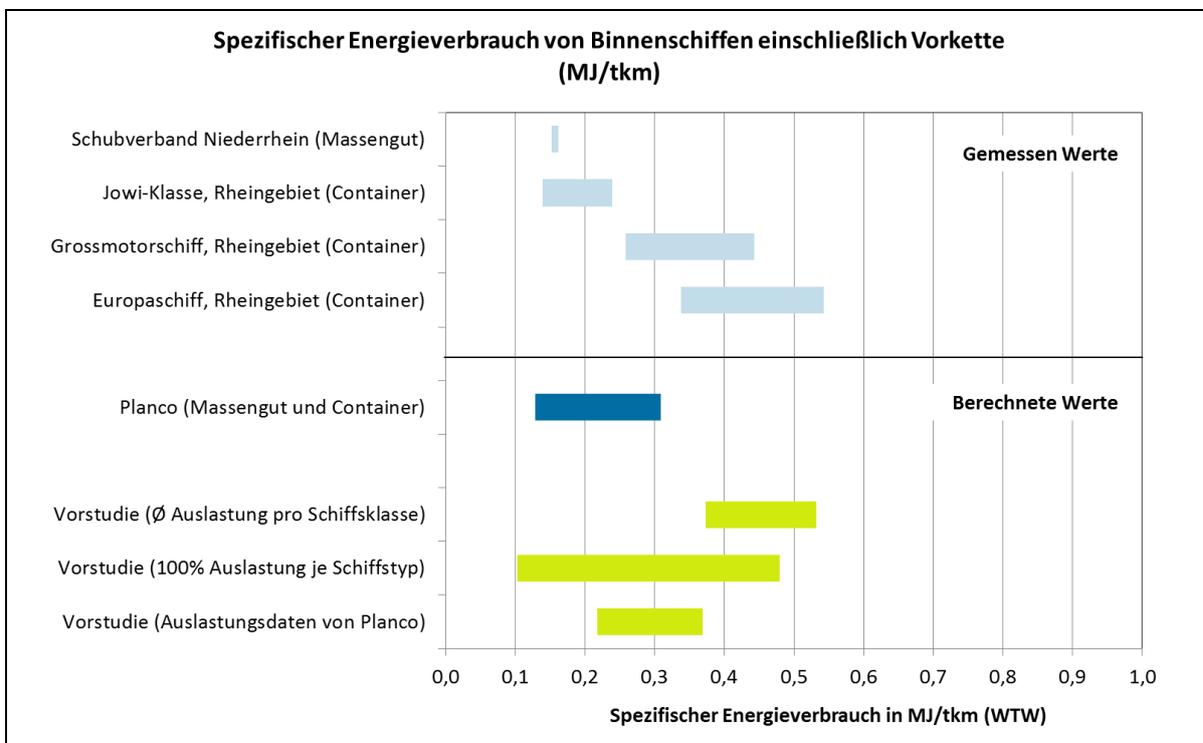


Abbildung 7: Vergleich von Messwerten und Planco-Werte mit den angepassten Energieverbrauchswerten für Binnenschiffe der Vorstudie [ZKR 2012; eigene Darstellung]

3.3 Vergleich der Ergebnissen der Vorstudie mit Ergebnissen für einzelne Flussabschnitte

Die Dieselenergieverbräuche für Gütermotorschiffe und Schubverbände für einzelne Flussabschnitte liegen deutschlandweit nicht direkt vor, können aber auf Basis der Werte, die im Kompendium „Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) für Investitionen an Binnenschiff-fahrtsstraßen“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung enthalten sind, abgeleitet werden [BMVBS 2011]. Das BMVBS-Kompendium enthält für verschiedene Flussabschnitte (der Rhein ist beispielsweise in fünf Abschnitte unterteilt) und Kanal-typen den effektiven Leistungsbedarf für Gütermotorschiffe, Schubverbände und Koppel-verbände getrennt nach Abladetiefen und Fahrtrichtungen (zu Tal und zu Berg). Der im Kompendium ausgewiesene effektive Leistungsbedarf stellt bereits das Produkt aus in-stallierter Motorleistung der Schiffe sowie Nutzungsgrad des Motors dar. Dabei werden die Gegebenheiten des betrachteten Flussabschnitts (z.B. Wassertiefen), der Beladungs-grad der Schiffe und die Fahrtrichtung berücksichtigt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Beispieldatensatz für den Leistungsbedarf von Binnenschiffen in kW auf dem Wasserstraßenabschnitt Rhein 5 von Duisburg zur Grenze Niederlande (km 780-567) für eine Fahrt zu Berg bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h gegen-über Grund [BMVBS 2011]

TT-Klasse	Abladetiefe in Metern									
	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
< 400	141	168	210	290	397					
401 – 650	127	141	154	182	244	325				
651 – 900	138	148	160	178	205	260				
901 – 1.000	139	148	161	179	207	265				
1.001 . 1.500	151	163	179	200	238	306				
1.501 – 2.000		180	197	218	242	300				
2.001 – 2.500		199	219	250	280	336				
2.501 – 3.000		216	238	266	301	356	415	498	538	
> 3.000		214	229	254	289	328	375	436	478	
2er Schubverband	493	508	558	606	661	725	798	885	973	1.063
4er Schubverband	1.011	1.068	1.270	1.556	1.870	2.194	2.520	2.778	3.042	3.316
6er Schubverband	1.361	1.444	1.713	2.078	2.455	2.786	3.064	3.318	3.661	4.023
Koppelverband Kanal	271	298	330	380	432	511	599	676	759	
Koppelverband groß		312	341	388	452	530	644	746	885	

Die im Kompendium ausgewiesenen Leistungsbedarfe stellen allerdings keine Messwerte dar, sondern wurden von der Planco Consulting GmbH unter der Annahme einer wirt-schaftlichen Fahrweise der Binnenschiffe konkret für die Flussabschnitte berechnet. Die Annahme einer wirtschaftlichen Fahrweise führt zu geringeren Fahrgeschwindigkeiten und damit auch zu geringeren effektiven Motorleistungen. Insbesondere bei Talfahrten wird die Strömungsgeschwindigkeit genutzt, um Energie zu sparen [Planco 2007; BMVBS 2011].

Um die Werte mit denen der Vorstudie vergleichen zu können, wurden die Werte entspre-chend der in Kapitel 3.1 vorgestellten Formel in Dieselverbräuche pro Schiffskilometer umgerechnet. Hierzu wurde ein spezifischer Dieselverbrauch von 0,2 kg/kWh [Planco 2007] sowie die für den Schiffsabschnitt angegebene Geschwindigkeit gegenüber Grund verwendet. Für Motorschiffe und Schubverbände standen zudem aus früheren Planco-Studien die dazugehörigen durchschnittlichen Tragfähigkeiten nach Schiffsgrößenklasse

zur Verfügung [Planco 2007]. Diese Angaben fehlen jedoch für die Koppelverbände, weshalb diese nicht in den Detailvergleich einbezogen werden konnten.

Weiterhin musste für den Vergleich neben der Ergänzung der Tragfähigkeit der Schiffe ein weiterer Aufbereitungsschritt durchgeführt werden. Konkret mussten aus den angegebenen Werten pro Flussabschnitt (siehe Tabelle 12) der Leistungsbedarf für Leerfahrten und Fahrten mit 100 % Auslastung ausgewählt werden. Für Leerfahrten wurden die jeweiligen Leistungen für die geringste im Kompendium ausgewiesene Abladetiefe, für Vollauslastung die Werte mit der größten Abladetiefe verwendet. Diese Vorgehensweise ist allerdings eine Näherung, da bei Flüssen mit geringen Wassertiefen insbesondere die großen Schiffe nicht voll beladen werden können. Die im BMVBS-Kompendium ausgewiesenen Werte stellen dann zwar den Energieverbrauch für ein auf dem Abschnitt maximal beladenes Schiff dar, das allerdings nicht maximal bis zur Kapazität beladen ist. Die für Lastfahrten ermittelten Werte entsprechen damit den höchsten Werten des BMVBS-Kompendiums, unterschätzen aber gerade für große Schiffe den realen Energieverbrauch für den Fall der Vollbeladung (100 % Auslastung).

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse dieser Aufbereitungsschritte für Motorschiffe. Getrennt für Leer- und Lastfahrt und nach Fahrtrichtung (zu Tal und zu Berg) sind die Dieserverbräuche, basierend auf den Angaben des BMVBS-Kompendiums, dargestellt. Die für die einzelnen Flussabschnitte ermittelten Verbrauchswerte sind farblich unterschiedlich für freifließende Flüsse, staugeregelte Flüsse und Kanäle gekennzeichnet. Die Werte der Vorstudie wurden in Abbildung 8 für den Vergleich zudem getrennt für Tal- und Bergfahrt dargestellt.

Der Vergleich der Dieserverbräuche für Gütermotorschiffe ergibt folgendes (siehe Abbildung 8):

- In der Regel liegen die Dieserverbrauchswerte, ermittelt auf Basis des BMVBS-Kompendiums, niedriger als die Dieserverbräuche der Vorstudie. Eine Ursache ist die unterstellte wirtschaftliche Fahrweise. Beispielsweise wird für Gütermotorschiffe bei Leerfahrten zu Berg im BMVBS-Kompendium eine Durchschnittsgeschwindigkeit unterstellt, die der des Gütermotorschiffs im beladenen Zustand entspricht. In der Vorstudie wurde hingegen unterstellt, dass die leeren Schiffe mit der maximal möglichen Geschwindigkeit fahren. Ähnlich ist auch zu erklären, warum der Energieverbrauch bei Lastfahrten zu Tal auf freifließenden Flüssen deutlich unter den Werten der Vorstudie liegt. Hier wird – wie bereits erwähnt – die Fließgeschwindigkeit ausgenutzt, um Energie zu sparen. Unabhängig davon zeigt die Gegenüberstellung, dass die Dieserverbräuche der Vorstudie für Gütermotorschiffe tendenziell am oberen Rand der möglichen Werte liegen. Realistisch dürften daher Werte zwischen den Werten der Vorstudie und denen des BMVBS-Kompendiums sein.
- Die Dieserverbräuche der Motorschiffe für staugeregelte Flüsse liegen nach dem BMVBS-Kompendium deutlich höher als die Energieverbräuche auf Kanälen. In der Regel liegen sie sogar im gleichen Größenbereich wie Fahrten auf freifließenden Flüssen (z. B. Fahrten zu Berg), teilweise sogar höher (z. B. Lastfahrten zu Tal). In der Vorstudie wurden staugeregelte Flüsse wie Kanäle behandelt. Diese Vorgehensweise unterschätzt den Energieverbrauch zumindest bei Bergfahrten erheblich. Der Dieserverbrauch der Gütermotorschiffe auf staugeregelten Flüssen muss daher getrennt betrachtet werden.
- Die Werte der Vorstudie für Kanalfahrten unterschätzen bei Leerfahrten tendenziell den Energieverbrauch und überschätzen ihn bei Lastfahrten.

- Insbesondere bei Bergfahrten sind die Dieselenergieverbräuche von Gütermotorschiffen mit kleinen Tragfähigkeiten (unter 700 t) nach dem BMVBS-Kompendium höher als bei Schiffen mit Tragfähigkeiten zwischen 700 und 1000 t. In der Vorstudie wurde unterstellt, dass der Energieverbrauch von Gütermotorschiffen bis 300 t Tragfähigkeit sinkt und erst unter dieser Schwelle gleich bleibt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass zum einen die Schwelle teilweise deutlich höher liegen müsste, zum anderen auch der Energieverbrauch bei kleinen Schiffen sogar höher liegen kann als bei größeren Schiffen.

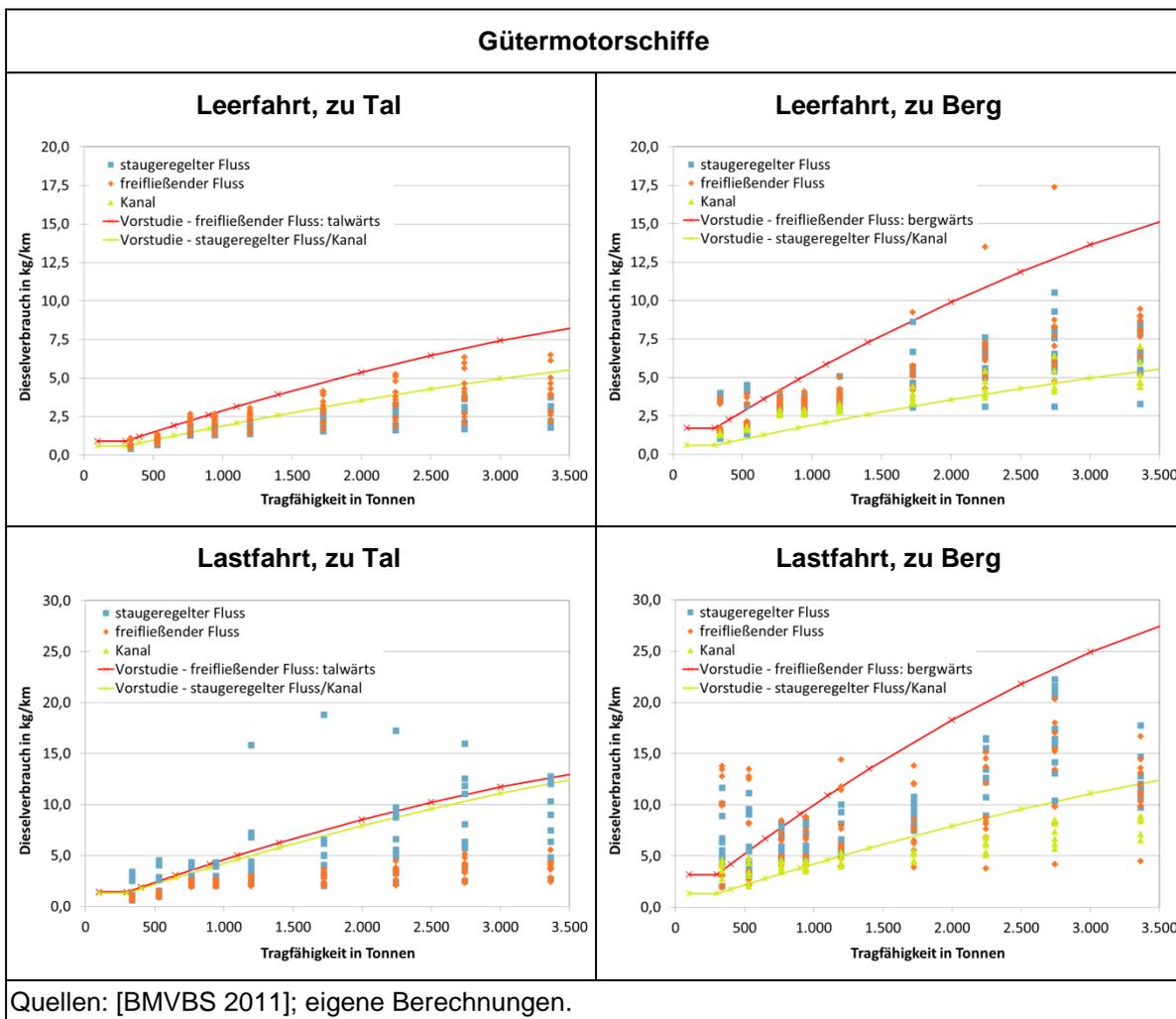


Abbildung 8: Dieselenergieverbrauch des Hauptmotors für Gütermotorschiffe in Abhängigkeit der Tragfähigkeit nach BMVBS-Kompendium „Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)“ sowie Vorstudie

Abbildung 9 zeigt die gleiche Gegenüberstellung der Dieselenergieverbräuche des BMVBS-Kompendiums und der Vorstudie für Schubverbände analog zur Abbildung 8 für Gütermotorschiffe. Die Gegenüberstellung zeigt für Bergfahrten eine gute Übereinstimmung, bei Talfahrten sind die Dieselenergieverbrauchswerte des BMVBS-Kompendiums deutlich geringer. Hier wirkt sich die Annahme der wirtschaftlichen Fahrweise am gravierendsten aus. Wie bereits bei den Gütermotorschiffen kann festgestellt werden, dass die Dieselenergieverbräuche

für staugeregelte Flüsse nicht mit denen für Kanalfahrten vergleichbar sind und diese zumindest für Bergfahrten deutlich unterschätzt werden.

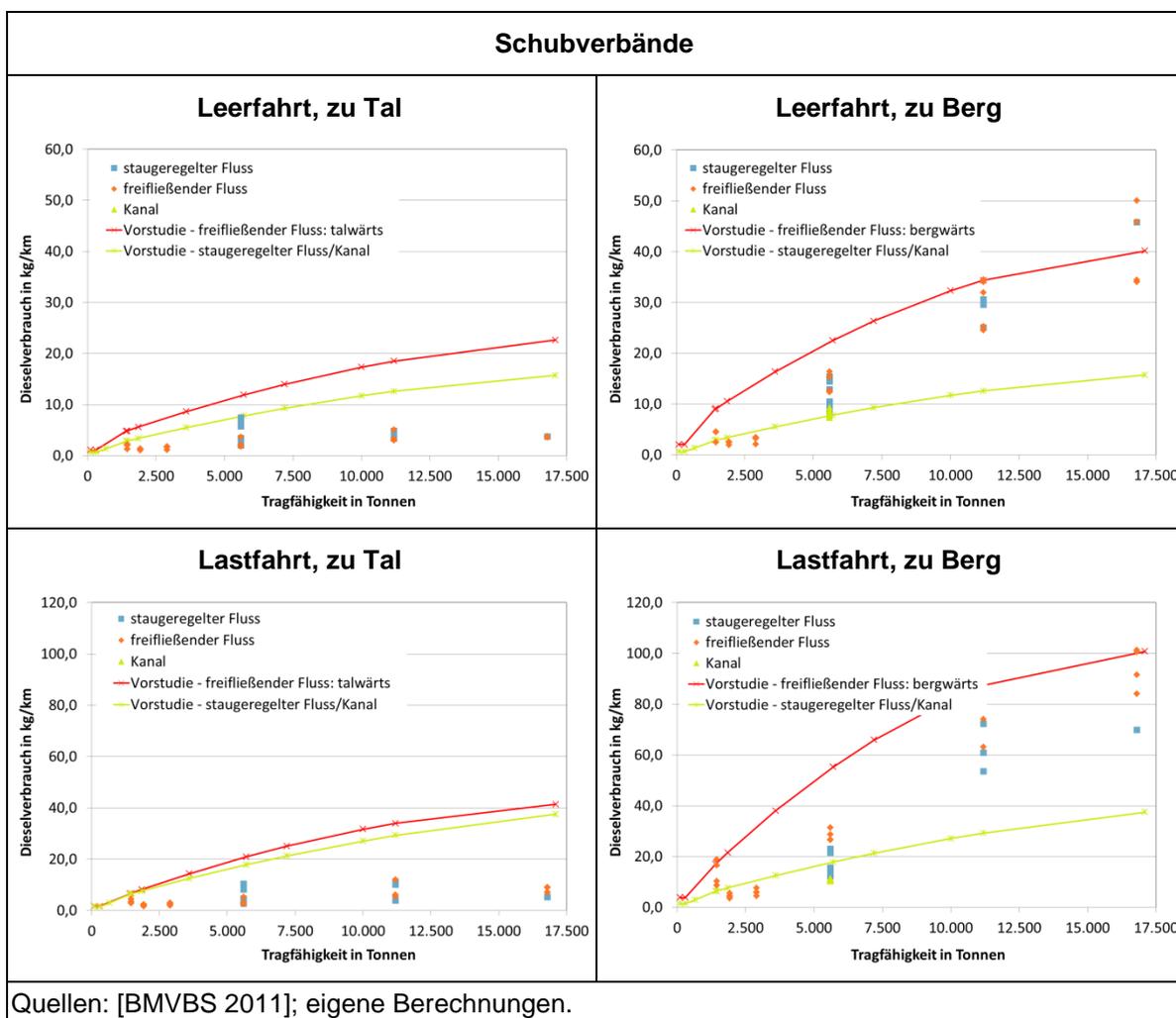


Abbildung 9: Dieserverbrauch des Hauptmotors für Schubverbände in Abhängigkeit der Tragfähigkeit nach BMVBS-Kompodium „Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)“ sowie Vorstudie

Als Gesamtfazit der Gegenüberstellung von Dieserverbräuchen, ermittelt nach BMVBS-Kompodium, und basierend auf der Vorstudie, kann festgehalten werden:

- Die direkte Übernahme der Energieverbrauchswerte des BMVBS-Kompodiums ist derzeit wenig sinnvoll, da es sich bei diesen Werten ebenfalls um berechnete und nicht um gemessene Werte handelt. Die berechneten Werte basieren zudem auf einer wirtschaftlichen Fahrweise der Binnenschiffe. Eine rein wirtschaftliche Fahrweise ist im realen Fahrbetrieb aber wenig wahrscheinlich (siehe auch Auswertung der ZKR auf Basis der Daten des Straßburger Abfallübereinkommens CDNI [ZKR 2013]).
- Die Verbrauchswerte der Vorstudie sind hingegen im Vergleich zu den Werten des BMVBS-Kompodiums tendenziell als zu hoch einzustufen, da hierbei unterstellt wurde, dass die Schiffe auf den Flussabschnitten entsprechend ihrem Beladungszustand die maximal mögliche Geschwindigkeit fahren. Daher werden realistische Ver-

brauchswerte tiefer sein als die Werte der Vorstudie und damit am oberen Rand der Verbrauchswerte des BMVBS-Kompandiums liegen.

- Der Energieverbrauch von staugeregelten Flüssen muss getrennt ermittelt werden; auf keinen Fall sollten die Dieselverbrauchswerte übernommen werden, die für Kanäle ermittelt wurden.
- Die Tragfähigkeitsgrenzen (Schwellenwert), ab denen sich die Energieverbräuche der Schiffe nicht mehr weiter reduzieren, sollten in Abhängigkeit der Schiffstypen, der Fahrtrichtung und der Beladung deutlich nach oben korrigiert werden.
- Zu guter Letzt zeigt die Gegenüberstellung, dass – soweit die DESTATIS-Verkehrsdaten es ermöglichen (z.B. für den Rhein) – eine getrennte Betrachtung der Fahrtrichtung (zu Tal und zu Berg) erfolgen sollte. Da viele beladene Schiffe auf dem Rhein zu Berg fahren und leere Schiffe zu Tal, ergeben sich andere Dieselenergieverbräuche als bei einer Berechnung auf Basis von für Tal- und Bergfahrten gemittelten Werten.

3.4 Anpassung der Dieselverbrauchswerte für Hauptmotoren der Vorstudie

Aufgrund des Vergleichs der Dieselverbrauchswerte, berechnet auf Basis des BMVBS-Kompandiums [BMVBS 2011], wurde ein Anpassungsbedarf der Energieverbrauchswerte der Vorstudie identifiziert. Im Folgenden wird getrennt für Gütermotorschiffe und Schubverbände vorgestellt, wie bei der Neuberechnung der Dieselverbrauchswerte der Vorstudie vorgegangen wird. Wie bereits in der Vorstudie werden dabei Polynome 2. Grades verwendet ($a x^2 + b x + c$), die den Dieselverbrauch der Hauptmotoren der Binnenschiffe in Abhängigkeit der Tragfähigkeit beschreiben. Die Kurven werden dabei getrennt für

- Flusstypen (freifließender Fluss, staugeregelter Fluss und Kanal)
- Berg- und Talfahrten sowie
- Leer- und Lastfahrten (somit für 0 % und 100 % Auslastung) ermittelt.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel ausgeführt wird dabei so vorgegangen, dass die bestehenden Kurven der Vorstudie so verschoben werden, dass sie den oberen Rand der Dieselverbrauchswerte des BMVBS-Kompandiums abdecken. Damit liegen die neuen Verbrauchswerte in der Regel unter denen der Vorstudie, aber gleichzeitig im oberen Bereich der Verbrauchswerte des BMVBS-Kompandiums. Dies dürfte der Praxis am besten entsprechen, da weder die Maximalgeschwindigkeit, wie sie in der Vorstudie unterstellt wurde, noch die Minimalgeschwindigkeit des BMVBS-Kompandiums, basierend auf einer wirtschaftlichen Fahrweise der Realität, entsprechen.

Praktisch wird dies so umgesetzt, dass entsprechend der Formel in Kapitel 3.1 der Nutzungsgrad des Motors und die Geschwindigkeit so reduziert werden, dass beide Werte zwischen denen der Vorstudie und denen des BMVBS-Kompandiums liegen. Diese Berechnung erfolgt getrennt für verschiedene Tragfähigkeitsklassen von Gütermotorschiffen und Schubverbänden. Dargestellt sind dann die Neuberechneten Kurven, die sich durch Regressionsrechnung auf Basis der Einzelwerte ergeben. Für die Regressionsrechnung (ein Polynom 2. Grades) wird angenommen, dass die Kurve durch den Nullpunkt geht ($c = 0$). Wie bereits ausgeführt, wird aber der Energieverbrauch unterhalb eines Tragfähigkeitsschwellenwertes nicht entsprechend der Kurve weiter geführt, sondern konstant gehalten. Dies spiegelt sich auch in den Verbrauchswerten des BMVBS-Kompandiums wi-

der. Unter besonderen Bedingungen (z.B. große Wassertiefen) können sogar kleine Schiffe höhere Verbrauchswerte haben als große Schiffe mit hoher Tragfähigkeit [Kranke et al. 2011].

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Neuberechnung getrennt für Gütermotorschiffe und Schubverbände dargestellt. Es sei in diesem Zusammenhang nochmals darauf hingewiesen, dass sich über die in den nächsten beiden Unterkapiteln dargestellte Kurven nur der Dieserverbrauch der Hauptmotoren ermitteln lässt. Unabhängig davon muss noch ein 5 %iger Aufschlag aufgrund des Dieserverbrauchs der Hilfsmotoren und Nebenaggregaten zur Stromerzeugung an Bord oder zum Manövrieren der Schiffe in Häfen oder in Schleusen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.1).

3.4.1 Gütermotorschiffe

Abbildung 10 zeigt für freifließende Flüsse die Anpassung der Energieverbrauchskurven für Gütermotorschiffe der Vorstudie an die Dieserverbrauchswerte des BMVBS-Kompodiums. Grundsätzlich wurden Motornutzungsgrade sowie Geschwindigkeiten für alle Situationen (Berg- und Tal- sowie Leer- und Lastfahrten) angepasst. Grundsätzlich liegen die neu berechneten Kurven so, dass sie im Normalfall deckungsgleich mit den hohen Verbrauchswerten des BMVBS-Kompodiums sind. Die Verbrauchswerte des BMVBS-Kompodiums liegen somit teilweise nochmals deutlich tiefer, was aber der Annahme der wirtschaftlichen Fahrweise geschuldet ist. Im Einzelfall liegen aber auch einzelne Dieserverbrauchswerte des Kompodiums über den Neuberechneten Verbrauchswerten.

Die größten Veränderungen gegenüber der Vorstudie ergeben sich durch die Neuberechnung bei Leerfahrten zu Berg und bei Lastfahrten zu Tal. Bei beiden kommt die beim BMVBS-Kompodium unterstellte wirtschaftliche Fahrweise der Gütermotorschiffe zum Tragen. Bei Lastfahrten zu Tal liegen die Neuberechneten Dieserverbräuche bei Schiffen mit höheren Tragfähigkeiten deutlich über den Werten des BMVBS-Kompodiums. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass eine weitere Absenkung dazu geführt hätte, dass die Verbrauchskurve mit der für Leerfahrten zu Tal identisch gewesen wäre. Die wird als nicht plausibel angesehen.

Eine weitere deutliche Veränderung ergibt sich dadurch, dass für Talfahrten der Energieverbrauch unterhalb von 500 t, bei Bergfahrten unterhalb von 1.000 Tonnen konstant gehalten werden (Vorstudie: generell unter 300 t). Bei Lastfahrten zu Berg müsste streng genommen für Schiffe unter 600 t sogar mit steigenden Verbrauchswerten gearbeitet werden. Dieser Effekt wird bei der Neuberechnung aber noch nicht berücksichtigt.

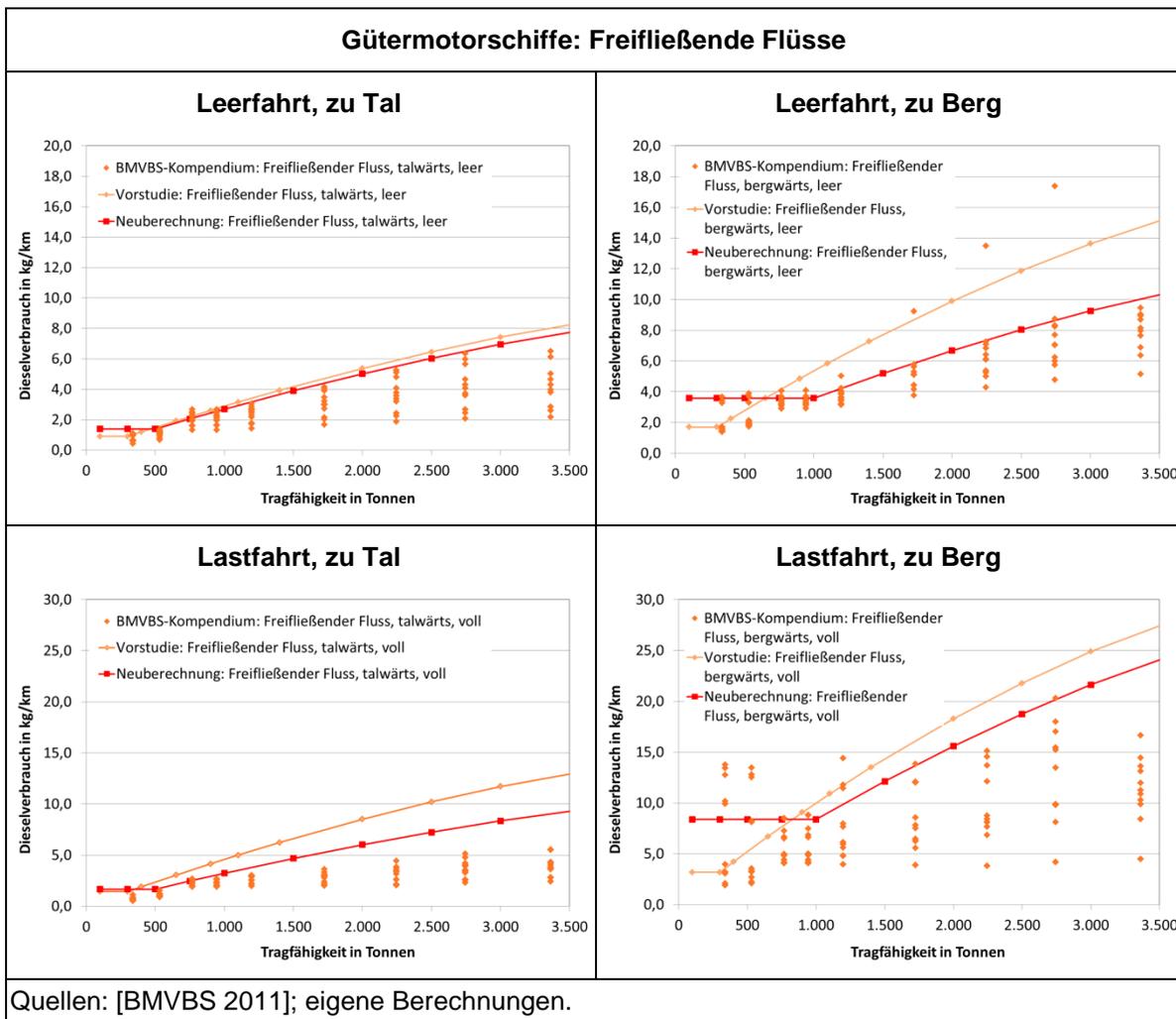


Abbildung 10: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf freifließenden Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Abbildung 11 zeigt die neuberechneten Dieserverbrauchskurven von Gütermotorschiffen auf staugeregelten Flüssen. Zum Vergleich sind die Dieserverbrauchswerte für Kanalfahrten in der Abbildung dargestellt, weil diese für staugeregelte Flüsse in der Vorstudie verwendet wurden. Die Abbildung zeigt, dass insbesondere bei Bergfahrten die neuberechneten Dieserverbrauchswerte der Gütermotorschiffe deutlich über den Werten der Vorstudie liegen. Auch bei Lastfahrten zu Tal führt die Neuberechnung zu einer leichten Anhebung der Dieserverbrauchswerte gegenüber der Vorstudie. Wie bei freifließenden Flüssen wurde der Dieselennergieverbrauch für Talfahrten unterhalb 500 Tonnen Tragfähigkeit und für Bergfahrten unterhalb 1.000 Tonnen Tragfähigkeit konstant gehalten.

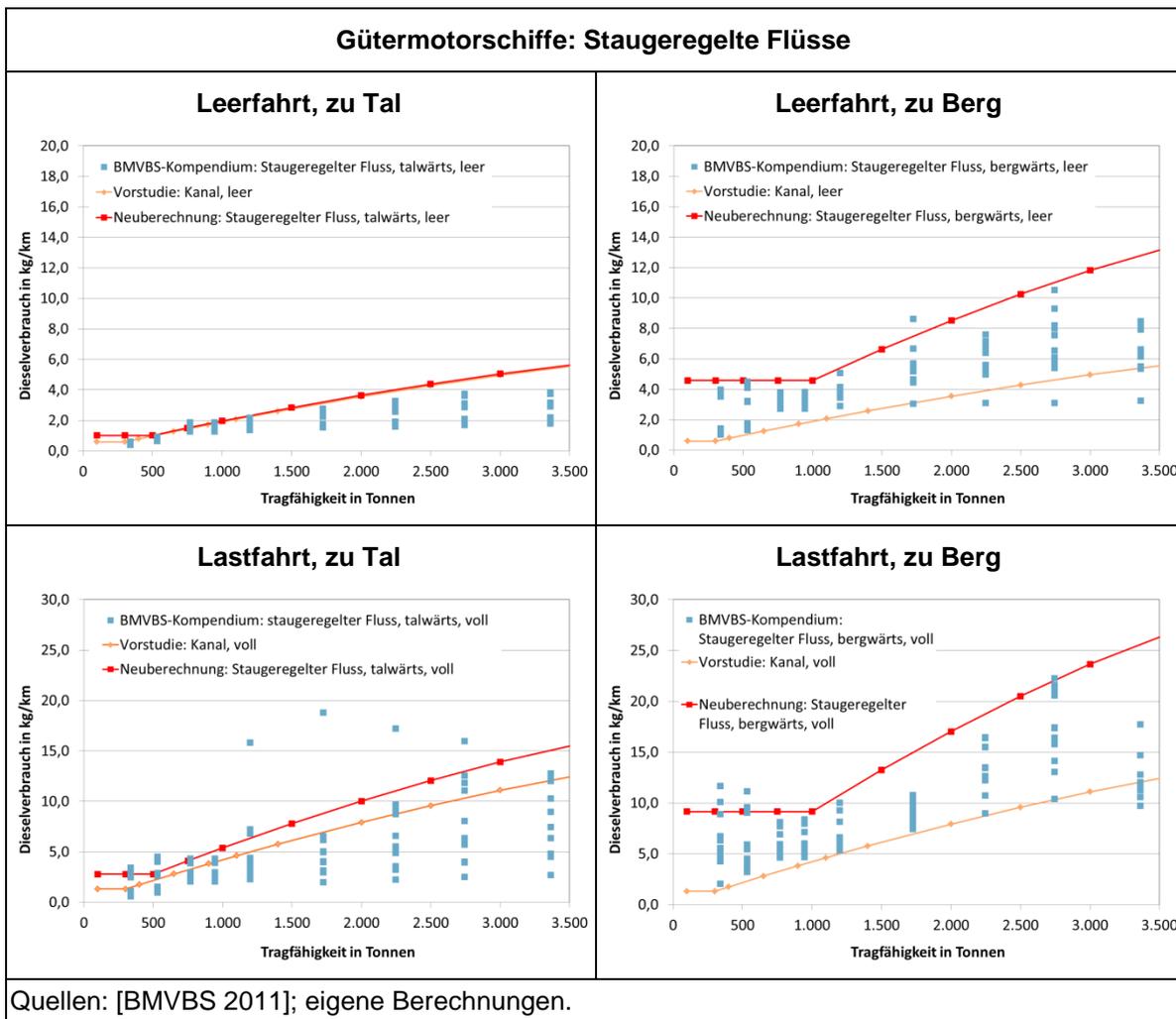


Abbildung 11: Aktualisierung des Dieselverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf staugeregelten Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Abbildung 12 zeigt, dass die Neuberechnung der Dieselenergieverbräuche für Kanalfahrten gegenüber der Vorstudie zu einer Anhebung der Werte für Leerfahrten und zu einer Absenkung der Werte für Lastfahrten von Gütermotorschiffen mit einer Tragfähigkeit über 1.000 t führt. Im Gegensatz zu Flüssen wird bei Lastfahrten auf Kanälen der Energieverbrauch bereits für Schiffe unter 1.500 t Tragfähigkeit konstant gehalten. Die Grenze für Leerfahrten ist hingegen mit 500 t Tragfähigkeit identisch mit denen der Flüsse.

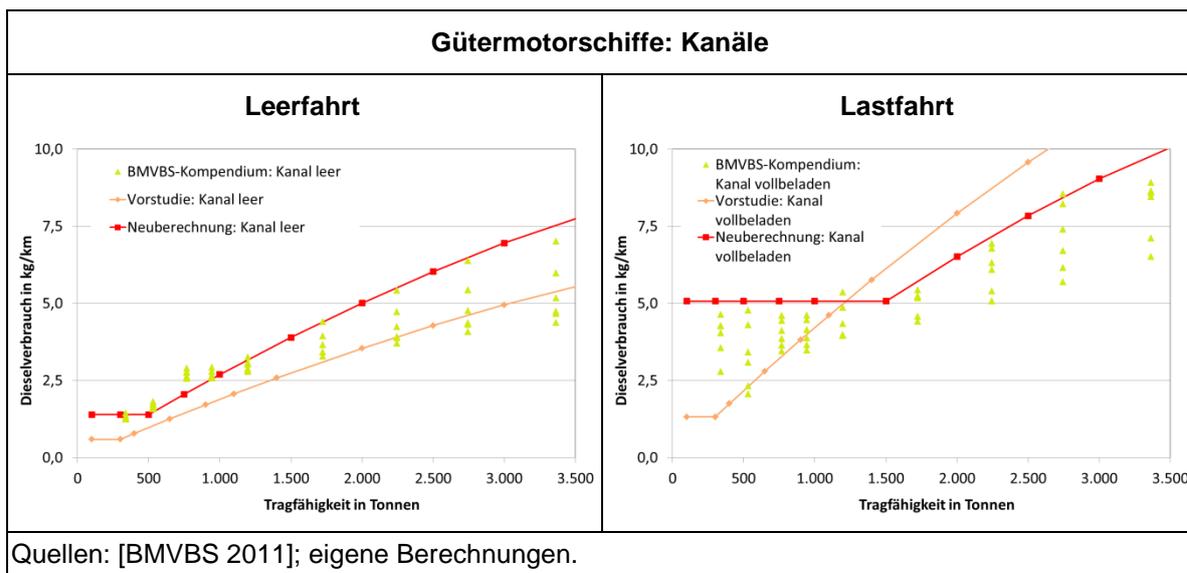


Abbildung 12: Aktualisierung des Dieseler Verbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf Kanälen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Die in der Abbildung 10, der Abbildung 11 und der Abbildung 12 unterstellten Motorauslastungen und Geschwindigkeiten der Gütermotorschiffe gegenüber Grund sind in der Tabelle 27 im Anhang aufgeführt. Diese Werte wurden so gewählt, dass die Kurven möglichst deckungsgleich mit den höchsten Verbrauchswerten des BMVBS-Kompendiums sind. Die Unterschiede beim Dieseler Verbrauch pro Schiffskilometer fallen bei der Neuberechnung gegenüber der Vorstudie meist geringer aus, als die hohen Veränderungen des Nutzungsgrades erwarten lassen würden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass gleichzeitig auch die Geschwindigkeit gegenüber Grund deutlich reduziert wurde. Die Schiffe brauchen somit weniger Diesel pro Betriebsstunde, sind aber auch deutlich langsamer unterwegs. Pro Schiffskilometer ist damit der Rückgang des Verbrauchs geringer.

Weiterhin enthält die Tabelle 27 im Anhang die Schwellenwerte, unterhalb dessen die Dieseler Verbräuche der Gütermotorschiffe konstant gehalten werden. Auch die Parameter a und b der Gleichung $a \cdot x^2 + b \cdot x$ (mit x für die Tragfähigkeit in t), die sich über Regressionsrechnung der Einzelwerte ergeben, sind in dieser Tabelle im Anhang enthalten.

3.4.2 Schubverbände

Im Gegensatz zu den Gütermotorschiffen liegen für die Schubverbände deutlich weniger berechnete Dieseler Verbrauchswerte auf Flussabschnittseben vor. Dennoch eignen sich auch diese Werte, um die Verbräuche der Schubverbände neu zu berechnen und damit die Angaben der Vorstudie zu aktualisieren.

Abbildung 13 zeigt für freifließende Flüsse die Neuberechnung der Dieseler Verbräuche von Schubverbänden differenziert nach Leer- und Lastfahrten sowie Tal- und Bergfahrten. Die größten Korrekturen treten bei Talfahrten auf, da sich dort die im BMVBS-Kompendium unterstellte wirtschaftliche Fahrweise am deutlichsten bemerkbar macht. Bei Leerfahrten zu Berg führt die Neuberechnung zu geringfügig höheren Dieseler Verbräuchen als die der Vorstudie. Bei den Dieseler Verbräuchen von Lastfahrten zu Berg sind hingegen die Veränderungen gegenüber der Vorstudie vernachlässigbar.

Als Schwellenwerte, unterhalb derer die Dieserverbräuche der Schubverbände konstant gehalten werden, liegt nach der Neuberechnung für Talfahrten bei 2.000 t Tragfähigkeit, für Bergfahrten bei 1.000 t. In der Vorstudie lag dieser Schwellenwert einheitlich für alle Fahrsituation bei 300 t Tragfähigkeit.

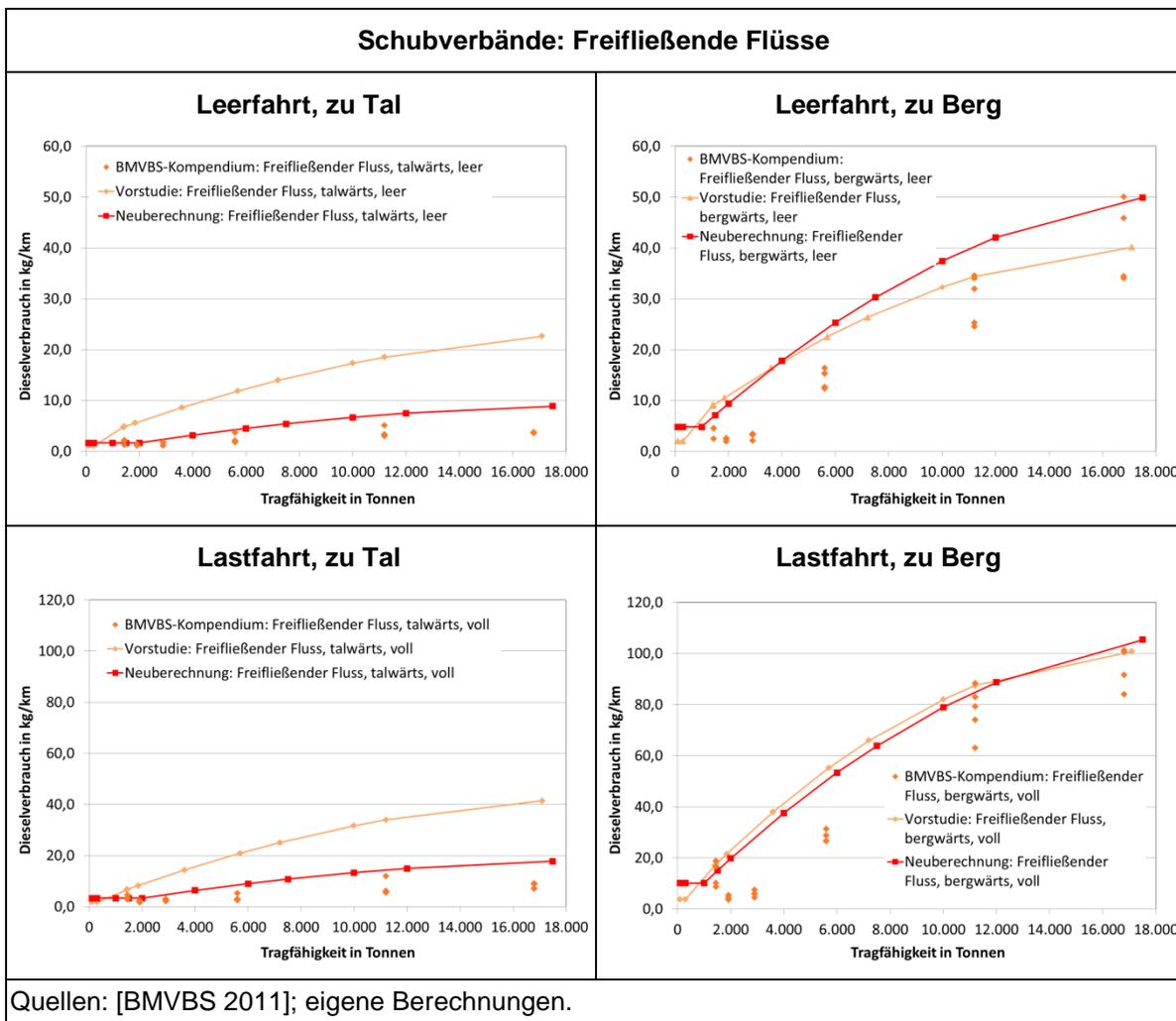


Abbildung 13: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf freifließenden Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Abbildung 14 zeigt analog zur Abbildung 13 die Verläufe für den Dieserverbrauch von Schubverbänden in Abhängigkeit der Tragfähigkeit für Berg- und Talfahrten sowie Last- und Leerfahrten auf staugeregelten Flüssen. Beim Vergleich der Werte mit den Werten der Vorstudie ist zu beachten, dass wie bei den Gütermotorschiffen für staugeregelte Flüsse die Energieverbrauchswerte für Kanäle verwendet wurden. Daher ergibt die Neuberechnung insbesondere für Bergfahrten eine deutliche Anhebung des Dieserverbrauchs. Für Lastfahrten zu Tal wurden hingegen die Energieverbrauchswerte gegenüber der Vorstudie leicht gesenkt. Dies ist wiederum der unterstellten wirtschaftlichen Fahrweise geschuldet.

Im Vergleich zu den freifließenden Flüssen liegen für die staugeregelten Flüsse nur Daten des BMVBS-Kompodiums für zwei Tragfähigkeitsklassen von Schubverbänden vor. Aus

diesem sind die abgeleiteten Kurven weniger verlässlich und sollten durch weitere Daten untermauert werden. Da zudem für kleine Tragfähigkeitsklassen keine Werte vorliegen, wurden die Schwellenwerte für freifließende Flüsse übernommen (2.000 t für Talfahrten und 1.000 t für Bergfahrten). Unterhalb dieser Schwellen werden die Energieverbrauchswerte wieder konstant gehalten.

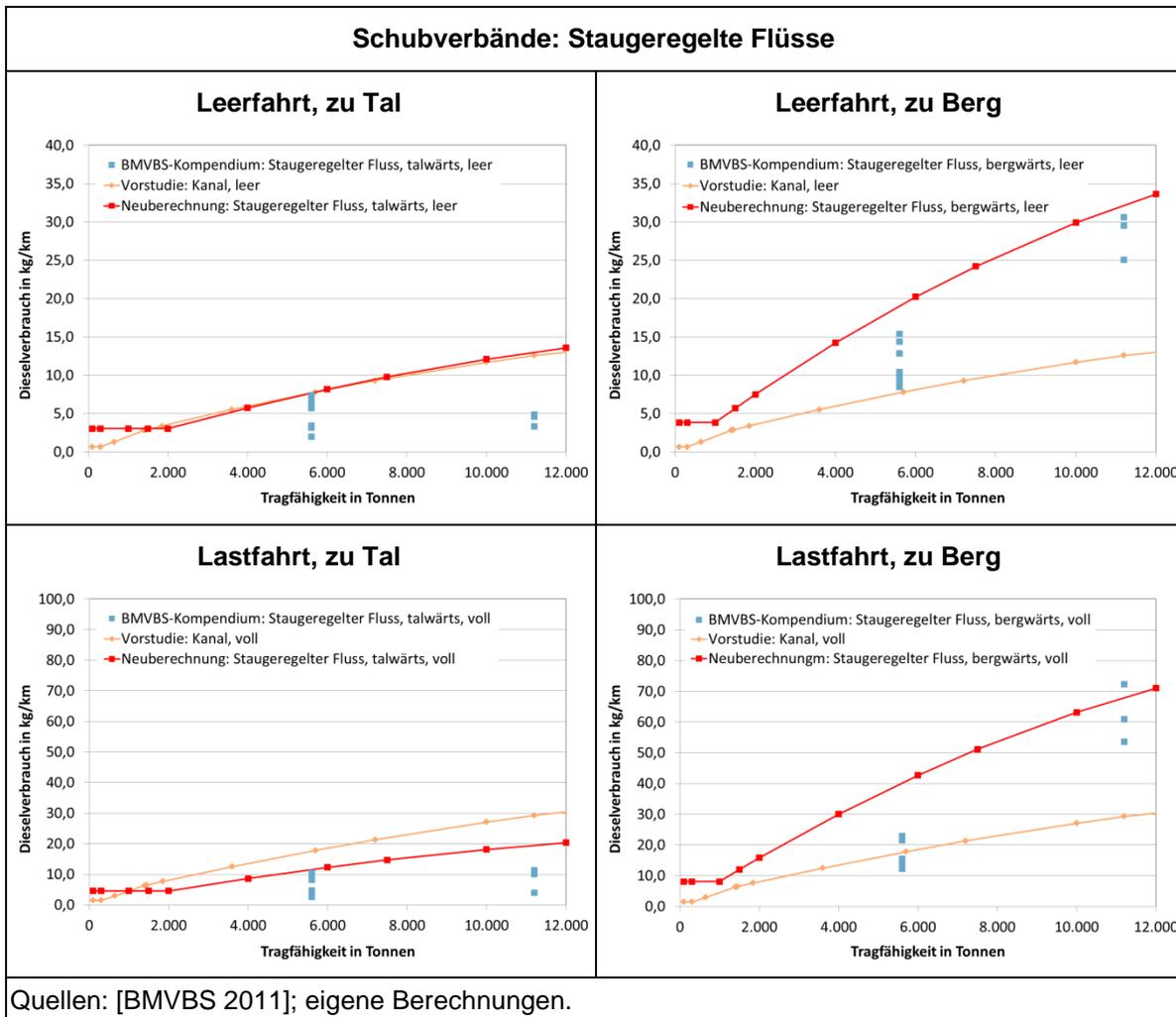


Abbildung 14: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf staugeregelten Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Abbildung 15 zeigt die Neuberechnung des Dieserverbrauchs von Schubverbänden bei Fahrten auf Kanälen. Das BMVBS-Kompodium liefert für Kanalfahrten lediglich für eine Tragfähigkeitsklasse Energieverbrauchswerte. Daher ist die Datengrundlage nochmals geringer als für Schubverbände auf staugeregelten Flüssen.

Grundsätzlich hat die Anpassung der Energieverbrauchswerte für Kanalfahrten bei Schubverbänden die gleiche Auswirkung wie für Gütermotorschiffe. Der Energieverbrauch für Leerfahrten wird leicht erhöht, der für Lastfahrten reduziert. Die Folge ist, dass beide Verbrauchskurven nah beieinander liegen. Der geringe Unterschied zwischen Leer- und Lastfahrten ist wiederum auf die ökonomische Fahrweise zurückzuführen.

Da über das BMVBS-Kompodium keine Verbrauchswerte für kleine Tragfähigkeitsklassen vorliegen, können auch keine Schwellenwerte aufgrund der Daten definiert werden,

unterhalb derer sich der Dieserverbrauch der Schiffe nicht mehr ändert. Vereinfachend wird der Schwellenwert von 2000 t Tragfähigkeit für Bergfahrten auf Flüssen generell übernommen – unabhängig, ob es sich um eine Leer- oder Lastfahrt handelt (siehe Abbildung 15).

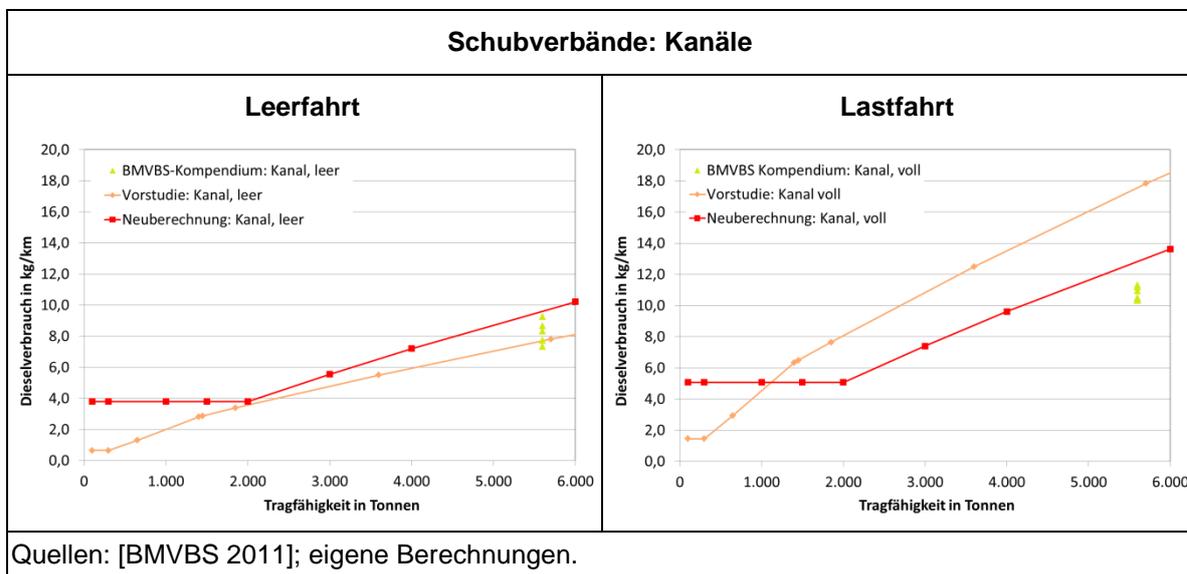


Abbildung 15: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf Kanälen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung

Tabelle 28 im Anhang fasst analog zu den Gütermotorschiffen nochmals die für Schubverbände unterstellten Motorauslastungen, Geschwindigkeiten und Schwellenwerte zusammen. Zudem sind die Parameter a und b für die Verbrauchskurven (Polynome 2. Grades) in Abhängigkeit der Tragfähigkeit angegeben (siehe auch Gütermotorschiffe).

3.4.3 Weitere Schiffstypen

Im Rahmen des im November 2012 durchgeführten Expertenworkshops wurde empfohlen, auch Koppelverbände (Kombination von einem Motorfrachtschiff und ein oder mehreren Leichtern) bei den spezifischen Energieverbrauchswerten zu berücksichtigen. Grund hierfür war, dass Koppelverbänden ein besonders niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch pro tkm unterstellt wird.

Aufgrund der mangelnden Datenlage zu Verbrauchswerten aus der Literatur konnten jedoch keine differenzierten Energieverbrauchsfunktionen für Koppelverbände abgeleitet werden. Da auch eine Differenzierung der Transportleistungen für Koppelverbände mit der derzeitigen Güterstatistik nicht ohne weiteres möglich ist, wurde auf die separate Berechnung von Koppelverbänden verzichtet. Diese sind daher in den Schubverbänden sowie den Tank- und Gütermotorschiffen enthalten.

4 Spezifische Emissionsfaktoren

4.1 Emissionsfaktoren von Binnenschiffsmotoren

Bei den Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt stehen die eingesetzten Motoren im Vordergrund. Im Gegensatz zu Straßenfahrzeugen werden die Motoren im Leben eines Schiffes oft ausgetauscht.

Als Datengrundlage für die Ableitung von Emissionsfaktoren dienen Prüfstandmessungen, die u.a. auch Bestandteil von Typgenehmigungsverfahren zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten sind. Als Einheit für die Emissionsfaktoren wird die Schadstoffmasse pro benötigte Antriebsenergie (g/kWh) angegeben. Letztere kann, wie in Kap. 3 beschrieben, für sämtliche Schichten des Verkehrsmengengerüsts in TREMOD, also differenziert nach Bezugsjahren, Schiffs- und Gewässertypen, etc., ermittelt werden. Das Produkt der beiden Werte ergibt somit die Emissionsmenge für die jeweiligen Flottenschichten und Bezugsjahre (siehe Gleichung).

$$E_{ges} = EV_{ges} * EF_{Motor}$$

Mit: E_{Ges} : Emissionen eines Schadstoffes pro Schicht und Bezugsjahr (in Gramm)

EV_{Ges} : Energieverbrauch pro Schicht und Bezugsjahr (in kWh)

EF_{Motor} : Am Motor gemessene Menge an Schadstoffemissionen (in Gramm pro kWh)

4.1.1 Abgrenzung und Einflussfaktoren

Da ca. 95 % des Energieverbrauchs von den Hauptantriebsmotoren verursacht wird, werden nur für diese Motoren Emissionsfaktoren ermittelt³. Die spezifischen Emissionsfaktoren hängen dabei vor allem von deren technischen Eigenschaften ab, die in Form von relevanten Klassen bzw. Emissionsstandards differenziert werden müssen.

In TREMOD werden diese über Motorbaujahrklassen differenziert. Hierdurch können einerseits allgemeine technologische Entwicklungen der letzten Jahrzehnte sowie die Anforderungen durch aktuelle (und zukünftige) Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren abgebildet werden.

Eine Emissionsgrenzwertgesetzgebung für Binnenschiffsmotoren erfolgt derzeit sowohl über die RheinSchUO als auch auf EU-Ebene über die Richtlinie 97/68/EG (vgl. Tabelle 13 und Tabelle 14). Die Grenzwerte beider Verfahren unterscheiden sich kaum voneinander. Im Wesentlichen bestehen die Unterschiede darin, dass in der EU-Gesetzgebung (97/68/EG) verschiedene Hubraumklassen definiert sind, während bei den ZKR-Stufen (weitgehend) stufenlose NOx-Grenzwerte in Abhängigkeit der Nenndrehzahl berechnet werden. Zudem gelten die ersten Grenzwerte der RheinSchUO schon seit dem Jahr 2002 (für Motoren ab 2003). Für die Zulassung eines Motors nach 2007 genügt es, wenn eine der Grenzwertverordnungen erfüllt wird.

³ Tendenziell ist davon auszugehen, dass die Emissionsfaktoren der kleineren Hilfsaggregate niedriger als die der Hauptmotoren liegen. Grund dafür sind die derzeit strengeren Emissionsgrenzwerte für kleinere Leistungsklassen sowie die schnelleren Austauschraten. In der Summe ist deren Beitrag jedoch als gering und damit nicht relevant einzuschätzen.

Tabelle 13: Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren nach RheinSchUO

Grenzwerte nach RheinSchUO (Werte in g/kWh)						
Nutzleistung [PN]	Inkraft-treten	CO	HC	NOx	PM	
ZKR I						
37 ≤ PN < 75 kW	01/2002	6,5	1,3	9,2	0,85	
75 ≤ PN < 130 kW		5,0			n ≥ 2800 min ⁻¹ : 9,2 500 ≤ n < 2800 min ⁻¹ : 45 x {n} ^{-0,2}	0,70
PN ≥ 130 kW				0,54		
ZKR II						
18 ≤ PN < 37 kW	07/2007	5,5	1,5	8,0	0,80	
37 ≤ PN < 75 kW		5,0	1,3	7,0	0,40	
75 ≤ PN < 130 kW			1,0	6,0	0,30	
130 ≤ PN < 560 kW		3,5			n ≥ 3150 min ⁻¹ : 6,0 343 ≤ n < 3150 min ⁻¹ : 45 x n ^{-0,2} -3 n < 343 min ⁻¹ : 11,0	0,20
PN ≥ 560 kW						

Tabelle 14: Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren nach Richtlinie 97/38/EG

Grenzwerte nach Richtlinie 97/38/EG (Werte in g/kWh)				
Kategorie/ Hubraum [SV*] in l pro Zylinder/ Nutzleistung [P]	Inkraft-treten	CO	HC + NOx	PM
Stufe IIIA				
V 1:1 / SV < 0,9 P ≥ 37 kW	01/2006	5,0	7,5	0,40
V 1:2 / 0,9 ≤ SV < 1,2			7,2	0,30
V 1:3 / 1,2 ≤ SV < 2,5				0,20
V 1:4 / 2,5 ≤ SV < 5	01/2007		7,8	0,27
V 2:1 / 5 ≤ SV < 15	01/2008		8,7	0,50
V 2:2 / 15 ≤ SV < 20 P < 3300 kW			9,8	
V 2:3 / 15 ≤ SV < 20 P ≥ 3300 kW			9,8	
V 2:4 / 20 ≤ SV < 25			11,0	
V 2:5 / 25 ≤ SV < 30				

*SV für „swept volume“

Zwar haben die Parameter Nennleistung und Drehzahl, wie die Grenzwertgesetzgebung verdeutlicht, einen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Der Einfachheit halber werden

diese für die verwendeten Emissionsfaktoren in dieser Studie jedoch nicht differenziert, sondern als Durchschnitt der jeweiligen Baujahrklassen/Emissionsstandards abgebildet.

Ebenfalls von Einfluss für die spezifischen Emissionsfaktoren ist das Lastprofil im realen Betrieb. Aufgrund der geringen Datenlage zu realen Lastzyklen und Emissionsmessungen im Motorenkennfeld wird vereinfachend angenommen, dass die standardisierten Lastzyklen aus Emissionsmessungen am Motorenprüfstand das reale Emissionsverhalten genügend abbilden.

Die Emissionsfaktoren werden nach folgenden Baujahrklassen unterschieden:

- vor 1970
- 1970-1979
- 1980-1990
- 1990-2002
- 2003-2006 (ZKR I)
- Ab 2007 (ZKR II/ Stufe IIIA)

4.1.2 Untersuchte Datenquellen und Ableitung der TREMOD-Werte

Als Datengrundlagen für die Ableitung der Emissionsfaktoren standen Messwerte sowie Angaben aus der Literatur zur Verfügung. Messdaten für ältere Motoren wurden vom WTZ Roßlau [WTZ 2011] bezogen, weitere Daten wurden von dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) zur Verfügung gestellt. Diese wurden im Rahmen einer Studie von 2001 [BfG 2001] zusammengestellt, jedoch war nur ein Teil der Datensätze mit Motorbaujahren versehen. Zahlreiche Messdaten aus aktuellen Typprüfungen wurden von der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission (ZSUK) bereitgestellt.

Eine Übersicht über die zugrundeliegenden Messdaten zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Übersicht der Datengrundlagen von Emissionsmessungen

	WTZ 2011	BfG 2001	ZSUK
Anzahl Motoren/Messungen	38	13*	363
Baujahre	1987 bis 2011	1966 bis 2000	2001 bis 2013
Nennleistung in kW	450 bis 3880	132 bis 5400	25 bis 3000
Nenn Drehzahl in min ⁻¹	375 bis 1800	375 bis 1800	750 bis 4300
* nicht für alle Schadstoffe			

Zusätzliche Angaben standen aus der Literatur zur Verfügung. In einer Studie der Bundesanstalt für Gewässerkunde [BfG 2001] wurden verschiedene Emissionstrends und zahlreiche Daten zu den Motorparametern der deutschen und niederländischen Flotte im Jahr 2001 beschrieben. Neben den hieraus vorhandenen Emissionsmessungen wurde diese Quelle vor allem für die Charakterisierung der Flotte nach Motorbaujahren (siehe Kap. 4.2) verwendet. Weitere Emissionsfaktoren standen aus dem niederländischen Emissionsregisters [PRTR 2011] und einer Untersuchung von [Oonk et al 2007] zur Verfügung, deren methodische Basis im Rahmen dieser Studie jedoch nicht näher untersucht werden konnte.

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Datenquellen und der hieraus abgeleiteten TREMOD-Faktoren zeigt Abbildung 16. Die Werte orientieren sich bei älteren Baujahren stark an den niederländischen Literaturangaben, bei den neueren Baujahren dagegen

vorwiegend an den verfügbaren Messwerten. Bei allen Schadstoffen zeigt sich, dass mit Inkrafttreten der Grenzwertgesetzgebung die Emissionen deutlich sinken.

Für die Schadstoffe CO und PM ergeben sich bei allen Quellen klare Trends: so sinken die Emissionen kontinuierlich mit zunehmendem Baujahr, die Messwerte vom WTZ und der BfG liegen dabei meist deutlich unter den Literaturangaben der niederländischen Quellen. Die TREMOD-Werte wurden für neuere Baujahre tendenziell niedriger angesetzt und orientieren sich an den Messungen der ZSUK und der WTZ.

Bei NO_x zeigen sich größere Differenzen: aus den Daten von Oonk et al und den Messwerten zeigen sich deutlich höhere Emissionen für Motoren ab den späten 80er Jahren und erst ab Mitte der 90er Jahre ein Rückgang der NO_x-Werte. In den Daten des PRTR werden die Faktoren generell niedriger angesetzt und zeigen keinen solchen zwischenzeitlichen ansteigenden Trend. Der beobachtete Anstieg der NO_x-Emissionen wird jedoch auch in [BfG 2001] beschrieben mit typischen Änderungen bei den Motorparametern begründet. So führt ein seit den 70ern steigender Nutzmitteldruck zu höheren Drücken und Temperaturen, die wiederum die NO_x-Bildung fördern. Dieser Trend wird in abgeschwächter Form in TREMOD übernommen.

Die HC-Faktoren zeigen ebenfalls unterschiedliche Trends: Entgegen einer konstanten Abnahme bei den Literaturwerten zeigen die Messungen einen zwischenzeitlichen Anstieg.

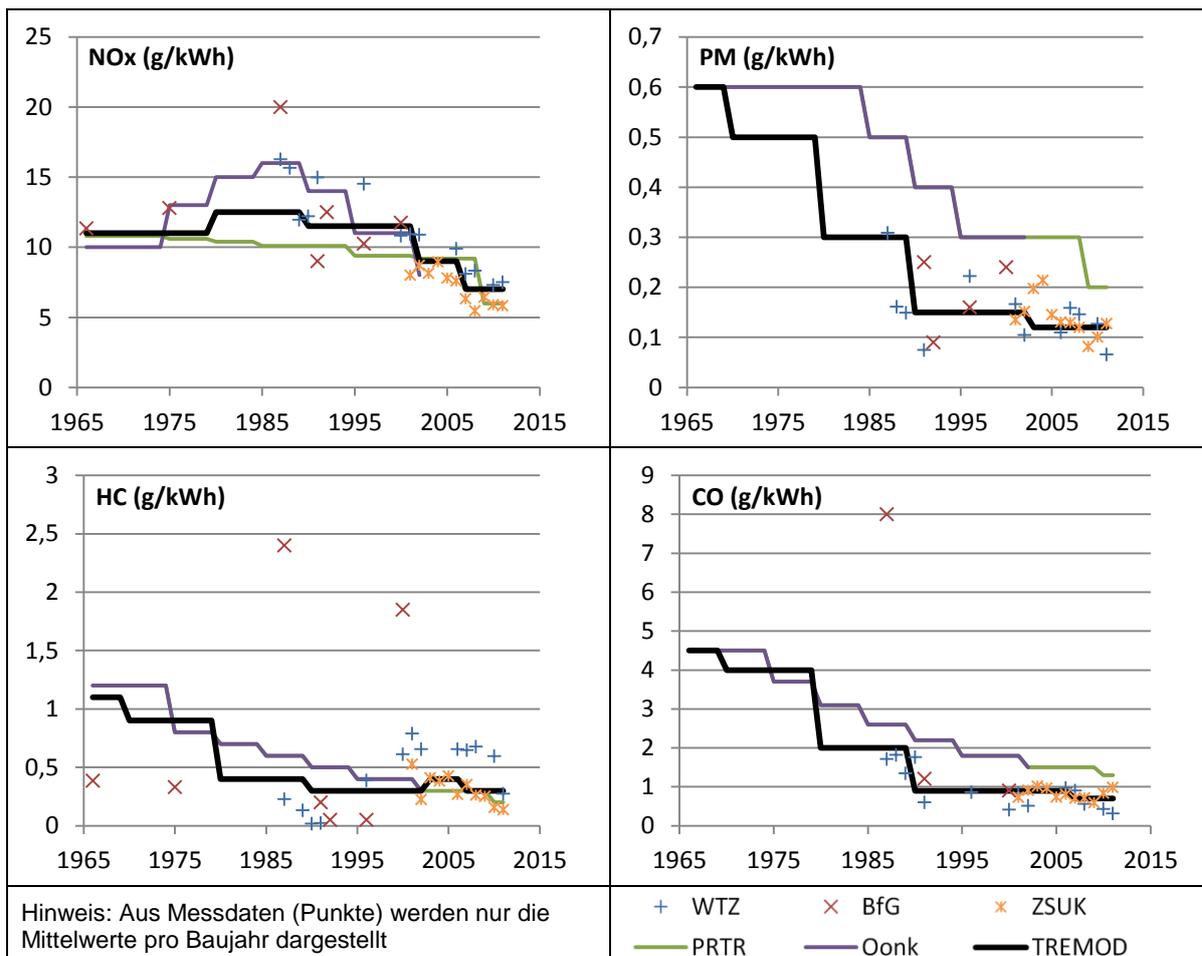


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren mit den Original-Datenquellen

Die für TREMOD abgeleiteten Emissionsfaktoren nach Baujahrklassen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Spezifische Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren in TREMOD

Baujahrklasse/ Emissionsstandard	CO	HC	NOx	PM
	Werte in g/kWh			
vor 1970	4,5	1,1	11	0,6
1970-1979	4	0,9	11	0,5
1980-1989	2	0,4	12,5	0,3
1990-2002	0,9	0,3	11,5	0,15
2003-2006 (ZKR I)	0,9	0,4	9	0,12
Ab 2007 (ZKR II/St IIIA)	0,7	0,3	7	0,12

4.2 Zuordnung der Emissionsfaktoren zur Binnenschiffsflotte

4.2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise und Methodik

Die Zuordnung der spezifischen Emissionsfaktoren zum Verkehrsmengengerüst ist über die Binnenschiffahrtsstatistik von DESTATIS nicht direkt möglich, da keine Motorparameter und Baujahre erfasst werden. Diese Informationen finden sich jedoch teilweise in den nationalen Schiffsregistern und in der Literatur. Daher mussten geeignete Schnittstellen dieser Datenquellen zu den Flotteneigenschaften des Verkehrsmengengerüsts gewählt werden, um aggregierte Emissionsfaktoren für die Flotte abzuleiten (siehe Kap. 4.2).

Daten zu den Motorenbeständen waren über folgende Quellen verfügbar:

- [BFG 2001]: Motoren- und Schiffsbestände für die deutsche Flotte im Jahr 2001
- [ZSUK 2013]: Aufstellung über den Einbau typgenehmigter Motoren (seit 2003) bis zum Jahr 2013
- [NLR]: Motoren- und Schiffsbestände für die niederländische Flotte im Jahr 2011, wie bei [ZSUK 2013] jedoch nur für typgenehmigte Motoren

Für die Auswertung der Altersstruktur wurde nach Tragfähigkeitsklassen und Schiffsflagge unterschieden.

Die Schiffsgröße bzw. Tragfähigkeitsklasse stellt einen wichtigen Parameter dar, da in den letzten Jahren die durchschnittliche Tragfähigkeit der Schiffe anstieg. Größere Schiffe verfügen damit in der Regel auch über jüngere Motoren.

Durch die Schiffsflagge können dagegen nationale Unterschiede sowohl bei den jährlichen Schiffsneubauten als auch bei den Erneuerungsraten der Motoren, z.B. aufgrund von Förderungsprogrammen, abgebildet werden. Aufgrund der begrenzten Datenlage wurde nur zwischen drei Tragfähigkeitsklassen (<1500 t, 1500-3000 t, >3000 t) und den beiden relevantesten Flaggen auf deutschen Gewässern, Deutschland und den Niederlanden, unterschieden. Alle weiteren Flaggen wurden mit den Charakteristika der deutschen Flotte berechnet.

Berechnung der Altersverteilung

Durch die verfügbaren Daten zu den Motorenbeständen kann der Zeitraum von 2003 bis heute gut mit Realdaten abgedeckt werden. Ebenso konnte die Bestandsaufstellung aus dem Jahr 2001 für ältere Motoren in Deutschland genutzt werden [BfG 2001].

Keine Daten zum Motorenbestand waren daher für niederländische Schiffe mit Motorbaujahren vor 2003 verfügbar. Für die deutsche Flotte mussten zusätzlich Annahmen darüber getroffen werden, wie sich die Altersverteilung aus dem Jahr 2001 bis heute entwickelt.

Die fehlenden Informationen wurden mithilfe von Modellannahmen für die Überlebenswahrscheinlichkeit der Motoren über festgelegte Absterberaten abgeleitet. Mit dieser Vorgehensweise lassen sich auch Entwicklungen der Altersverteilungen ableiten, die im Rahmen des TREMOD-Szenarios bis 2030 benötigt werden (Kap. 6.1.2). Da für die niederländische Flotte keine Altersverteilung der Motoren mit Baujahr vor 2003 bekannt war, wurde hier die Altersverteilung der Schiffe selbst – entsprechend dem Alter des Erstmotors - angenommen.

Die Absterberaten werden als Funktion in Abhängigkeit der mittleren Lebenszeiten über das Motorenalter ausgedrückt (siehe Abbildung 17). Hierbei wird angenommen, dass 50 % der Motoren die mittlere Lebenszeit erreicht, beim Erreichen der doppelten Lebenszeit sind 100 % der Motoren „abgestorben“.

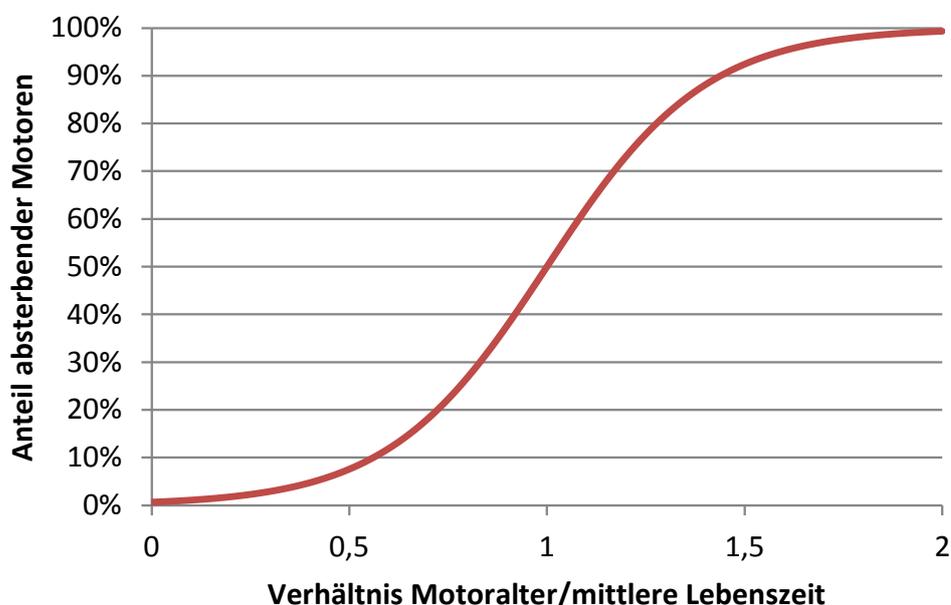


Abbildung 17: Standard-Absterbekurve für Hauptantriebsmotoren

Für die mittlere Lebenszeit existieren verschiedene Angaben in der Literatur. Die Lebenszeit der Motoren hängt u.a. stark von der Nenndrehzahl ab, welche in den letzten Jahren im Durchschnitt gestiegen ist [BfG 2001]. Hierdurch ist tendenziell von einem Rückgang der mittleren Lebenszeit bei Binnenschiffsmotoren auszugehen. Deutsche Quellen gehen davon aus, dass derzeitige Motoren eine mittlere Lebenserwartung von 15-18 Jahren und ältere Motoren eine Lebenszeit von 30-38 Jahre haben [Planco 2007, ZKR 1999]. In den Daten der BfG-Studie von 2001 beträgt der Anteil der Motoren mit einem Alter von über 60 Jahre nur ca. 2 % am Bestand. Die Annahmen für die mittlere Lebenszeit älterer Motoren scheinen damit plausibel. In Bezug auf die niederländische Flotte werden kürzere Austauschraten von 10 Jahren angenommen, die nicht genauer begründet werden [TML 2007].

Für die Ableitung der Altersverteilung in dieser Studie werden folgende Lebenszeiten angenommen:

- bis Baujahr 1990: 38 Jahre
- 1990 bis 1999: 20 Jahre
- Ab 2000: 12 Jahre

4.2.2 Altersverteilung der Hauptmotoren auf Binnenschiffen

Aus den mittels Absterberaten ergänzten Motordatensätzen ergeben sich folgende Altersverteilungen für die Hauptmotoren der deutschen und niederländischen Flotte (siehe Abbildung 18).

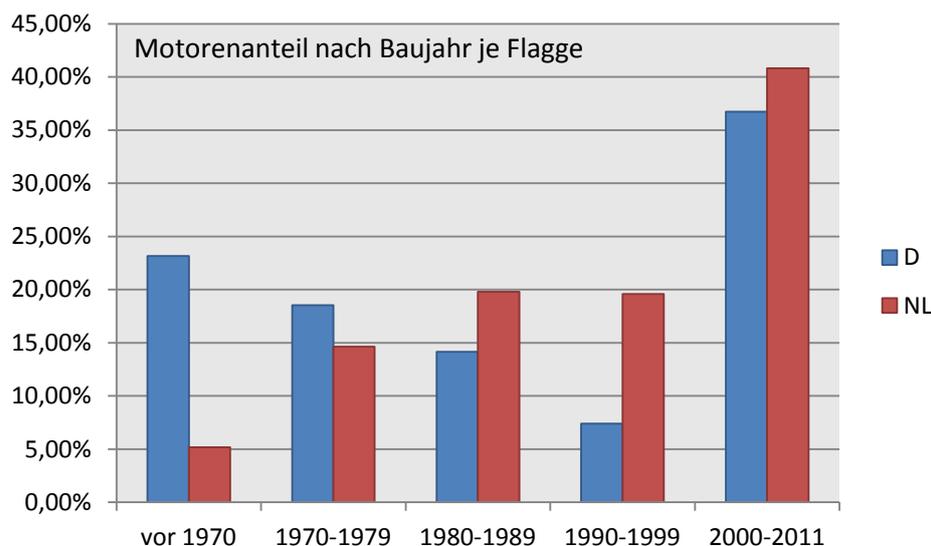


Abbildung 18: Altersverteilung der Motoren auf deutschen und niederländischen Schiffen

Es zeigt sich, dass die niederländische Flotte tendenziell über jüngere Motoren verfügt. Dies begründet sich vor allem aufgrund des größeren Anteils neuerer Schiffe: über 25 % der Flotte - vorwiegend größere Schiffe - wurde nach 2000 gebaut, während der Anteil der deutschen Flotte dieses Zeitraums nur ca. 7 % beträgt [ELVIS 2012; NLR 2012]. Dennoch wurde vor allem in der deutschen Flotte innerhalb der letzten zehn Jahre ein beträchtlicher Anteil der Motoren ausgetauscht.

Plausibilisierung der Altersverteilung

Das mittlere Alter aus den abgeleiteten Verteilungen für 2011 liegt für die deutsche Flotte bei ca. 25 Jahren, für die niederländische Flotte bei ca. 19 Jahren. Im Vergleich mit Erhebungen aus dem Jahr 2001 [BfG 2001] haben sich die Motoren beider Flotten, insbesondere der deutschen, deutlich verjüngt. In beiden Ländern gilt seit einigen Jahren ein Motorenförderungsprogramm, welches unterstützend dazu geführt haben könnte, dass das mittlere Alter der Motoren deutlich unter dem der Schiffe liegt. Das Durchschnittsalter der niederländischen Motoren liegt jedoch deutlich über dem von Duyzer et al. 2007 (in [TNO 2010] abgeleiteten Wert. Tendenziell wird das höhere mittlere Alter in Anlehnung an die BfG-Studie als repräsentativer angesehen, da hierbei Daten von ca. 5000 Motoren zugrunde lagen während bei Duyzer et al. 2007 lediglich eine Befragung von 146 Schiffen vorlag. Ebenso konnten über die im Rahmen von Typgenehmigungsverfahren erfassten Motoren die Erneuerung in den letzten Jahren zum Großteil erfasst werden ([ZSUK 2013], [NLR 2012]).

Inwieweit die ermittelte Altersverteilung auf die tatsächlich eingesetzten Binnenschiffe zutrifft, kann nicht vollständig beantwortet werden, da ältere und kleinere Schiffe möglich-

erweise registriert aber kaum eingesetzt werden. Eine hinreichende Berücksichtigung dieses Effekts dürfte jedoch durch die Differenzierung nach Schiffgrößenklassen gegeben sein, da über 75 % der Transportleistung in Deutschland von Schiffen über 1500 t Tragfähigkeit erbracht wird.

Tabelle 17: Vergleich des mittleren Alters für Binnenschiffmotoren

	Diese Studie (2011)	[BfG 2001]	Duyzer et al., 2007, in [TNO 2010]
Deutsche Flotte	25 Jahre	35 Jahre*	-
Niederländische Flotte	19 Jahre	24 Jahre	9 Jahre

*Wert aus Graphik in [BfG 2001] abgeleitet

Die Altersstruktur der Binnenschiffmotoren für TREMOD nach Tragfähigkeitsklassen zeigt sich anhand Abbildung 19. Bei der Tragfähigkeitsklasse > 3000 t erfüllen demnach 22-28 % der Flotte die ZKR II/St. IIIA Standards. Bei den kleineren Schiffen ist der Anteil alter Motoren höher und die nationalen Unterschiede noch deutlicher. So erfüllen bei der deutschen Flotte <1500 t 14 % der Motoren die Stufe ZKR II/ IIIA, der Anteil von Motoren vor 1970 liegt mit 31 % weit höher als bei der niederländischen Flotte.

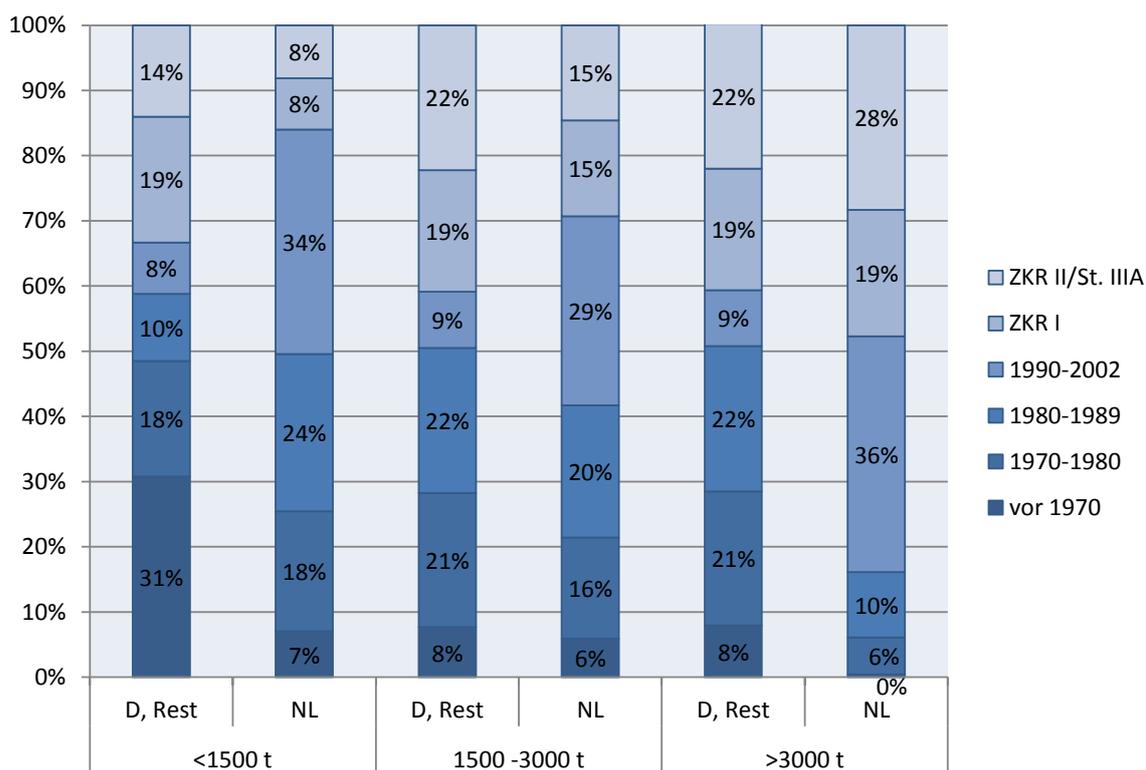


Abbildung 19: Anteil des Motorenbestands je Schicht nach Emissionsstandards im Jahr 2011

4.2.3 Aggregierte Emissionsfaktoren nach Flottenmerkmalen

Aus den zuvor abgeleiteten Altersverteilungen der Hauptmotoren können aggregierte Emissionsfaktoren für die festgelegten Flottenschichten und pro Bezugsjahr berechnet werden (Tabelle 18). Diese lassen sich wiederum mit den Informationen des Verkehrsmengengerüsts verknüpfen. Es zeigt sich hierbei, dass die spezifischen Emissionen am höchsten bei kleineren Schiffen liegen, da diese im Durchschnitt über wesentlich ältere

Motoren verfügen. Auch liegen die Emissionsfaktoren der niederländischen Flotte tendenziell deutlich unter denen der deutschen (deren Eigenschaften auch für die restlichen Flotten angenommen werden).

Tabelle 18: Differenzierte Emissionsfaktoren in TREMOD für das Bezugsjahr 2011

Flottenschicht		CO	HC	NOx	PM
		Werte in g/kWh			
<1500 t	NL	2,0	0,50	11,1	0,28
	D, Rest	2,6	0,68	10,2	0,36
1500 -3000 t	NL	1,8	0,48	10,6	0,25
	D, Rest	2,0	0,53	10,1	0,28
>3000 t	NL	1,1	0,37	9,8	0,17
	D, Rest	1,9	0,50	10,4	0,28

5 Ergebnisse und Diskussion für die Jahre 2010 bis 2012

5.1 Verkehrsmengen und Energieverbrauch

5.1.1 Ergebnisse für die einzelnen Ladungsarten

Die Ergebnisse der Anpassung des Verkehrsmengengerüsts und der daraus berechnete Energieverbrauch nach Ladungsarten zeigt Tabelle 19.

Tabelle 19: Fahr-, Transportleistungen und Energieverbrauch nach Ladungsarten 2010 bis 2012

Jahr	Ladungsart	Fahrleistung in Mio km	Transportleistung		Mittlere Tragfähigkeit in t	Mittlere Auslastung	Dieselverbrauch	
			in Mrd tkm	In Mio TEU			in Mega- tonnen	in g/tkm
2010	Flüssiges Massengut	14,56	13,56		2.164	43%	131	9,7
	Festes Schüttgut	31,40	35,69		1.978	57%	287	8,0
	Stückgut	4,74	4,21		1.843	48%	37	8,9
	Container	3,40	6,10	638	2.994	60%	43	7,0
	sonstiges	1,90	2,71		2.073	69%	21	7,9
	Insgesamt	56,00	62,28	638	2.080	53%	520	8,3
2011	Flüssiges Massengut	12,88	10,04		2.160	36%	112	11,1
	Festes Schüttgut	30,20	31,04		2.012	51%	272	8,8
	Stückgut	6,23	5,97		2.040	47%	59	9,9
	Container	3,05	5,47	579	2.989	60%	34	6,3
	sonstiges	1,96	2,51		2.194	58%	22	8,7
	Insgesamt	54,32	55,03	579	2.111	48%	499	9,1
2012	Flüssiges Massengut	12,14	11,13		2.157	43%	111	10,0
	Festes Schüttgut	28,67	33,22		2.024	57%	265	8,0
	Stückgut	5,44	6,20		2.095	54%	56	9,0
	Container	3,06	5,66	603	3.083	60%	35	6,1
	sonstiges	1,42	2,28		2.326	69%	18	7,9
	Insgesamt	50,73	58,49	603	2.136	54%	485	8,3

Folgende Trends sind hierbei zu erkennen:

- Den höchsten Anteil an der Transportleistung und am Energieverbrauch haben feste Schüttgüter, gefolgt von flüssigen Massengütern.
- Die mittlere Tragfähigkeit der Gütertransporte nahm in Deutschland von 2010 bis 2012 kontinuierlich von 2.080 Tonnen auf 2.136 Tonnen zu, der durchschnittliche Auslastungsgrad der mittleren Tragfähigkeit lag zwischen 48 % (2011) und 54 % (2012).
- Der spezifische Verbrauch pro tkm wird wesentlich von der Auslastung der Schiffe bestimmt.

- Im Jahr 2011 liegt dieser –bedingt durch häufige Niedrigwasserverhältnisse- deutlich über 2010 und 2012.
- Flüssige Massengüter haben unter den Ladungsarten den höchsten spezifischen Verbrauch, da durch den hohen Anteil von Leerfahrten nur eine geringe Auslastung entsteht.
- Containertransporte haben durch ihre hohe mittlere Tragfähigkeit (ca. 3000 Tonnen) und eine mittlere Auslastung von 60 % den geringsten spezifischen Verbrauch.
- Der mittlere spezifische Energieverbrauch für die gesamte Binnenschifffahrt liegt zwischen 8,3 g/tkm und 9,1 g/tkm. Der für 2011 errechnete Wert von 9,1 g/tkm stimmt sehr gut mit dem Top-Down abgeleiteten Wert von 9,4 g/tkm der ZKR für die westeuropäische Flotte überein (vgl. Kap. 3.1).

5.1.2 Ergebnisse differenziert nach Flussstraßen

Das Transportaufkommen ist sehr unterschiedlich auf die einzelnen Flussstraßen verteilt (Tabelle 20). Im Jahr 2012 entfiel 80 % der gesamten Transportleistung auf das Rheingebiet, welches jedoch nur 24 % der Wasserstraßenlänge in Deutschland ausmacht.

Der durchschnittliche mittlere Dieserverbrauch auf dem größtenteils freifließenden Rhein beträgt 8,5 g/tkm und liegt damit leicht über dem bundesweiten Durchschnittswert von 8,3 g/tkm. Insgesamt bewegt sich der mittlere Verbrauch pro Flussstraße zwischen 4,9 g/tkm (Westhafenkanal, Gebiet Berlin) und 14,4 g/tkm (Peene, Mecklenburg-Vorpommern).

Tabelle 20: Transportleistung und Energieverbrauch nach Flussstraßen im Jahr 2012

Nr	Flussstraße	Gewässertyp	Klasse	Länge in km	Transportleistung in Mio tkm	Energieverbrauch	
						in Tonnen	in g/tkm
111	Elbe bis Magdeburg	freifließend	Va	334	207	2.313	11,2
113	Saale, Halle-Trotha bis Elbe)	staugeregt	IV	88,0	0,1	0,9	9,9
121	Elbe, Magdeburg bis Schnackenburg	freifließend	Va	139	43	419	9,8
122	Elbe-Havel-Kanal	Kanal	IV	58	134	1.068	8,0
123	Pareyer-Verbindungskanal	Kanal	Va	4	2	13	7,7
124	Untere Havel Wasserstraße	staugeregt	III	150	138	1.536	11,2
125	Havel-Kanal	Kanal	IV	35	14	133	9,7
136	Niegripper Verbindungskanal	Kanal	IV	2	1,0	8	7,6
137	Rothenseer Verbindungskanal	Kanal	IV	5	14	93	6,8
141	Elbe, Schnackenburg bis Hamburg	freifließend	Vlb	135	347	2.741	7,9
142	Müritz-Elde-Wasserstraße	staugeregt	III	184	1,4	14	10,5
144	Elbe-Lübeck-Kanal	Kanal	IV	67	32	223	6,9
145	Untertrave	freifließend	Vlc	21	1,4	12	8,5
146	Elbe-Seitenkanal	Kanal	Vb	115	1.012	5.784	5,7
151	Elbe, Hamburg bis Seegrenze	freifließend	Vlc	120	323	2.029	6,3
154	Schwinge	staugeregt	Vlc	5	1,1	10	9,1
155	Pinnau	staugeregt	Vlc	10	0,2	2	9,3
157	Stör / Elbe	freifließend	Vlc	51	2	17	7,4
158	Oste	staugeregt	Vlc	74	0,5	5	10,1
191	Nord-Ostsee-Kanal	Kanal	Vlc	109	86	569	6,6
1	Elbe			1.706	2.359	16.992	7,2
212	Weser, Hannoversch-Münden bis Minden	staugeregt	IV	204	2	14	8,4
221	Weser, Minden bis Bremen	staugeregt	IV	142	443	4.173	9,4
231	Weser, Bremen bis Seegrenze	freifließend	Vlc	84	284	2.207	7,8
232	Hunte	freifließend	ohne	25	62	489	7,9
2	Wesergebiet			455	790	6.883	8,7
311	Mittellandkanalgebiet, Bergeshövede bis Minden	Kanal	Vb	101	921	5.897	6,4
312	Stichkanal Osnabrück	Kanal	IV	15	7	51	7,2
321	Mittellandkanalgebiet, Minden bis Braunschweig	Kanal	Vb	119	1.108	7.060	6,4
322	Stichkanal Hannover bis Linden	Kanal	IV	11	3	28	8,8
323	Stichkanal Misburg	Kanal	IV	3	0,4	4	10,4
324	Stichkanal Hildesheim	Kanal	IV	15	8	57	7,0
325	Stichkanal Salzgitter	Kanal	Vb	18	46	277	6,0
326	Mittellandkanalgebiet, Braunschweig bis Elbe	Kanal	Vb	105	777	5.038	6,5
3	Mittellandkanalgebiet			387	2.872	18.412	6,4
411	Ruhrwasserstraße	staugeregt	IV	12	4	33	9,2
412	Rhein-Herne-Kanal	Kanal	Vb	49	378	2.508	6,6
413	Wesel-Datteln-Kanal	Kanal	Vb	60	934	6.166	6,6
414	Datteln-Hamm-Kanal	Kanal	IV	47	155	975	6,3
415	Dortmund-Ems-Kanal, Dortmund bis Datteln	Kanal	IV	21	63	409	6,5
421	Dortmund-Ems-Kanal, Datteln bis Bergeshövede	Kanal	IV	87	971	6.229	6,4
422	Dortmund-Ems-Kanal, Bergeshövede bis Herbrum	Kanal	IV	110	457	3.004	6,6
423	Dortmund-Ems-Kanal, Herbrum bis Emden, Unterems	freifließend	Vlc	53	246	1.896	7,7
425	Dortmund-Ems-Kanal, Emden bis Seegrenze, Ems	freifließend	Vlc	37	177	1.517	8,6
451	Küsten-Kanal	Kanal	ohne	70	165	1.030	6,2
453	Ems-Jade-Kanal	Kanal	ohne	72	0,5	4	7,0
455	Jadebusen - Ost (Wesermarsch)	freifließend	Vlc	37,0	0,1	0,7	8,7
4	Westdeutsches Kanalgebiet			655	3.549	23.771	6,7

Nr	Flussstraße	Gewässertyp	Klasse	Länge in km	Transportleistung in Mio tkm	Energieverbrauch	
						in Tonnen	in g/tkm
511	Rhein, Rheinfelden bis Straßburg	staugeregelt	Vib	52	75	600	8,0
512	Rhein, Straßburg bis Neuburgweier	staugeregelt	Vib	59	1.337	11.512	8,6
513	Rhein, Neuburgweier bis Mannheim	freifließend	Vib	83	2.794	21.423	7,7
521	Rhein, Mannheim bis Bingen	freifließend	Vib	92	4.657	38.037	8,2
522	Rhein, Bingen bis Lülsdorf	freifließend	Vib	137	8.985	75.173	8,4
524	Mosel	staugeregelt	Vb	242	2.799	24.556	8,8
527	Saar, Völklingen bis Güdigen (Grenze)	staugeregelt	I	40	10	82	8,5
528	Saar, Mosel bis Völklingen	staugeregelt	Vb	60	255	2.068	8,1
531	Rhein, Lülsdorf bis Orsoy	freifließend	Vic	128	11.214	93.745	8,4
532	Rhein, Orsoy bis niederländische Grenze	freifließend	Vic	72	10.596	92.127	8,7
533	Schiffahrtsweg Rhein-Kleve	staugeregelt	Vic	10,0	0,01	0,1	13,3
543	Main, Mündung des Main-Donau-Kanals bis Würzburg	Kanal	Va	141	843	5.975	7,1
544	Main, Würzburg bis Aschaffenburg	staugeregelt	Va	167	1.189	12.977	10,9
545	Main, Aschaffenburg bis Offenbach	staugeregelt	Vb	41	365	3.976	10,9
546	Main, Offenbach bis zum Rhein	staugeregelt	Vb	39	513	5.429	10,6
551	Neckar, Heilbronn bis zum Rhein	staugeregelt	Va	109	733	6.352	8,7
552	Neckar, Stuttgart bis Heilbronn	staugeregelt	Va	77	170	1.626	9,5
553	Neckar, Plochingen bis Stuttgart	staugeregelt	Va	15	12	115	9,9
5	Rheingebiet, Lahn, Main, Mosel, Neckar, Saar			1.564	46.548	395.774	8,5
601	Main-Donau-Kanal	Kanal	Va	171	895	6.383	7,1
611	Donau, Kelheim bis Regensburg	staugeregelt	Vb	42	206	2.308	11,2
613	Donau, Regensburg bis Vilshofen	staugeregelt	Vib	124	611	6.746	11,0
614	Donau, Vilshofen bis österreichische Grenze	staugeregelt	Vib	47	233	2.619	11,2
6	Donaugebiet			384	1.945	18.056	9,3
711	Berliner Havel	staugeregelt	IV	27	28	306	10,8
712	Berlin-Spandauer-Schiffahrtskanal und Hohenzollernkanal	Kanal	IV	12	3	28	8,9
713	Spree-Oder Wasserstraße (Untere-, Berliner- und Treptow Spree)	staugeregelt	IV	33	40	462	11,6
714	Spree-Oder Wasserstraße (Dahme, Langer See, Oder-Spree-Kanal)	Kanal	IV	14	27	228	8,4
715	Teltow-Kanal	Kanal	IV	39	27	272	10,2
716	Britzer Zweigkanal	Kanal	IV	3	1	9	7,9
731	Wannsee, Griebnitzkanal	Kanal	IV	5	1	13	11,4
732	Westhafenkanal	Kanal	IV	7	0,5	2	4,9
733	Charlottenburger Verbindungskanal	Kanal	IV	3,0	0,02	0,2	11,3
734	Landwehrkanal	Kanal	IV	2	0,1	2	11,5
735	Neuköllner Schiffahrtskanal	Kanal	IV	11,0	0,1	0,6	11,3
736	Müggelspree	staugeregelt	I	4	1	13	9,1
738	Wernsdorfer Seenkette	staugeregelt	IV	25	9	83	9,4
739	Seddinsee, Gosener Kanal und Rüdersdorfer Gewässer	Kanal	IV	6	0,0	0,1	8,2
7	Gebiet Berlin			191	138	1.418	10,3
811	Havel-Oder-Wasserstraße	staugeregelt	IV	150	133	1.856	13,9
812	Hohensaaten-Friedrichsthaler-Wasserstraße	staugeregelt	IV	56	44	606	13,8
813	Schwedter Querfahrt	staugeregelt	IV	4	0,4	5	11,6
815	Veltener Stichkanal	Kanal	IV	3	0,3	2	7,6
819	Obere Havel-Wasserstraße	staugeregelt	I	98	0,5	5	10,8
820	Müritz-Havel-Wasserstraße	staugeregelt	I	32	0,2	2	10,6
821	Rheinsberger Gewässer	staugeregelt	ohne	13	0,1	0,5	8,7
827	Werblliner Gewässer	staugeregelt	ohne	17	0,0	0,3	9,1
851	Spree-Oder-Wasserstraße	staugeregelt	I	83	42	535	12,7
852	Dahme In Brandenburg	staugeregelt	ohne	25	7	69	9,4
853	Teupitzer Gewässer	staugeregelt	ohne	18,0	0,05	0,4	9,4
854	Storkower Gewässer	staugeregelt	I	33,0	0,02	0,2	9,2
857	Rüdersdorfer Gewässer	staugeregelt	I	15	1	6	9,2
871	Oder	staugeregelt	IV	162	35	470	13,3
8	Gebiet Brandenburg			709	264	3.558	13,5
911	Oderhaff (Kleines Haff)	staugeregelt	Vic	29	0,3	3	10,0
912	Peenestrom	freifließend	Vic	62	0,3	3	9,0
917	Peene	freifließend	IV	99	0,3	4	14,4
941	Greifswalder Bodden	staugeregelt	Vic	29	8	90	11,7
942	Östliches Stralsunder Fahrwasser	staugeregelt	Vic	23	9	105	11,7
943	Westliches Stralsunder Fahrwasser	staugeregelt	Vic	19	7	86	11,7
9	Mecklenburg-Vorpommern			261	25	292	11,7
	Wasserstraßen insgesamt			6.312	58.491	485.155	8,3

5.1.3 Einfluss der Tragfähigkeit und der mittleren Auslastung

Wie die Energieverbrauchsfunktionen in Kap. 3.4 verdeutlichen, nimmt das Verhältnis von Energieverbrauch und Tragfähigkeit mit zunehmender Tragfähigkeit der Schiffe ab. Durch einen Transport der Ladung auf größeren Schiffen lässt sich somit tendenziell bei gleicher Transportleistung Kraftstoff einsparen.

Die Auswertung der Güterstatistik ergibt jedoch, dass größere Schiffe in der Regel schlechter ausgelastet sind als kleinere (Abbildung 20, links). Insbesondere im Jahr 2011 ist dieser Trend verstärkt zu beobachten, was durch die vorherrschend niedrigen Wasserstände in diesem Jahr zu erklären ist. Größere Schiffe können in solchen Fällen einen geringeren Teil ihrer Tragfähigkeit ausnutzen. Weiterhin wurden im Jahr 2011 keine Transporte auf Schiffen mit über 4000 Tonnen Tragfähigkeit verzeichnet.

Die geringen Auslastungsgrade führen zu einem höheren spezifischen Energieverbrauch pro tkm. Wie in Abbildung 20 rechts zu sehen ist, haben sehr kleine Schiffsklassen zwar den mit Abstand höchsten Verbrauch (ca. 15 g/tkm). Jedoch ergibt sich ab einer Tragfähigkeit von über 1500 Tonnen kaum noch ein Verbrauchsvorteil für größere Schiffe, insbesondere im Jahr 2011.

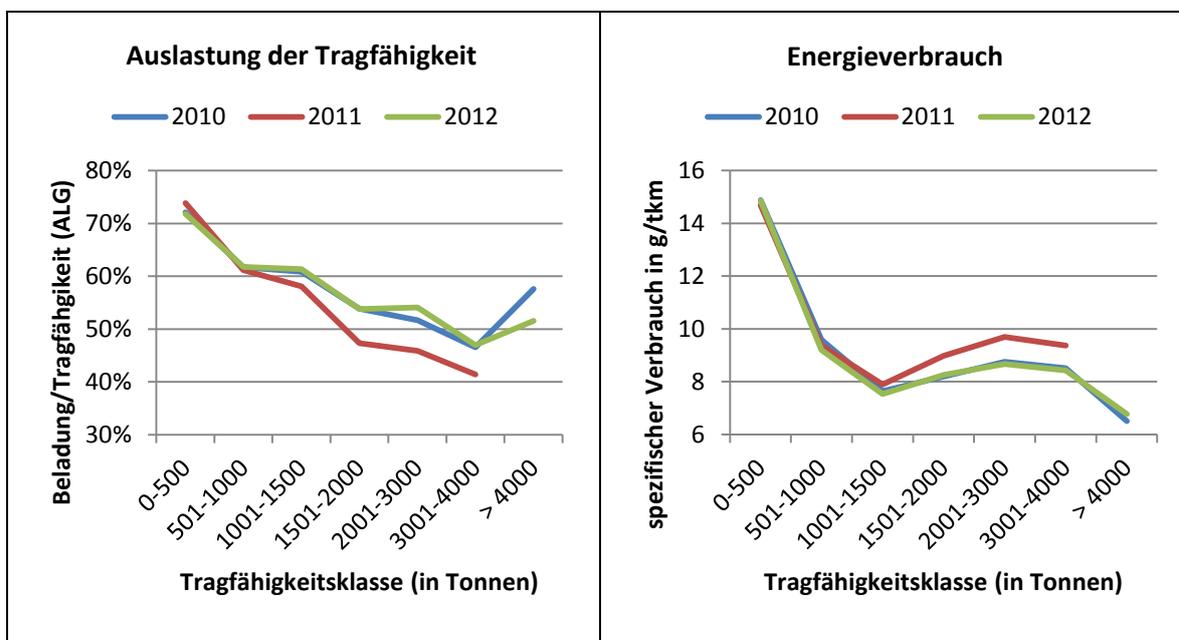


Abbildung 20: Durchschnittlicher Auslastungsgrad und Energieverbrauch nach Tragfähigkeitsklassen 2010 bis 2012

5.2 Schadstoff- und Treibhausgasemissionen

5.2.1 Gesamtemissionen in Deutschland und Vergleich mit TREMOD 5.3

Die Ergebnisse der Hochrechnung für den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen der Binnenschifffahrt im Vergleich mit TREMOD (v. 5.3) zeigt Tabelle 21.

Tabelle 21: Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland 2010-2012 im Vergleich mit TREMOD 5.3

Komponente	Version	2010	2011	2012
Angaben in Tonnen pro Jahr				
Dieselverbrauch	TREMOD 5.3	597.384	527.720	560.487
	Diese Studie	519.955	499.006	485.155
	Änderung	-13%	-5%	-13%
CO ₂	TREMOD 5.3	1.899.085	1.677.621	1.781.788
	Diese Studie	1.652.938	1.586.339	1.542.309
	Änderung	-13%	-5%	-13%
CO	TREMOD 5.3	6.037	5.332	5.653
	Diese Studie	5.042	4.438	4.438
	Änderung	-16%	-17%	-21%
HC	TREMOD 5.3	2.515	2.222	2.355
	Diese Studie	1.338	1.260	1.197
	Änderung	-47%	-43%	-49%
NO _x	TREMOD 5.3	33.380	29.107	30.459
	Diese Studie	27.046	25.724	24.691
	Änderung	-19%	-12%	-19%
PM	TREMOD 5.3	1.067	938	991
	Diese Studie	702	659	623
	Änderung	-34%	-30%	-37%

Mit den Berechnungsannahmen der Vorstudie ergeben sich folgende Trends:

- Der Energieverbrauch liegt zwischen 13 % und 5 % unter den bisher mit TREMOD berechneten Werten. Im Vergleich der Bezugsjahre sticht vor allem das Jahr 2011 heraus. Dies ist auf die niedrige mittlere Kapazitätsauslastung der Schiffe in diesem Jahr zurückzuführen, die einen höheren spezifischen Verbrauch zur Folge hat. Die CO₂-Emissionen sinken dementsprechend um den gleichen Betrag.
- Die Schadstoffemissionen liegen deutlich unter den bisherigen Berechnungen. Die höchste Minderung zeigt sich bei den HC (bis -49 %) gefolgt von PM (-37 %), CO (-21 %) und NO_x (-19 %).

Es zeigt sich damit, dass die verbesserte Datengrundlage in der Summe zu einer besseren Umweltbewertung der Binnenschifffahrt führt, als dies mit dem bisherigen TREMOD-Modell möglich war.

5.2.2 Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren mit anderen Quellen

Aus den Energieverbrauchswerten und den in Kap. 4.2.3 abgeleiteten Emissionsfaktoren nach Flottenmerkmalen lassen sich die Schadstoffemissionen in hoher Differenzierung berechnen. Um einen Abgleich mit den globalen Emissionsfaktoren anderer Studien zu ermöglichen, kann aus den differenzierten Emissionsdaten jedoch auch ein mittlerer Emissionsfaktor für die gesamte Binnenschifffahrt in einem Bezugsjahr gebildet werden.

Verglichen mit Angaben aus anderen Studien liegen die somit ermittelten Emissionsfaktoren in einer ähnlichen Größenordnung (Tabelle 22). Eine gute Übereinstimmung ergibt sich bei PM und CO, während die HC-Emissionsfaktoren dieser Studie zwischen den von [Planco 2007] und jeden aus den niederländischen Quellen ermittelten Werten liegen. Insbesondere der Emissionsfaktor für NO_x liegt jedoch über den Emissionsfaktoren in anderen Quellen.

Bei allen Schadstoffen sind die Werte deutlich geringer als die bisher in TREMOD (v. 5.3) angenommenen Emissionsfaktoren. Es kann also angenommen werden, dass über die differenzierte Ableitung von Emissionsfaktoren die Emissionen der Binnenschifffahrt besser als bisher abgebildet werden kann. Auch kann auf Basis dieser Datengrundlage die zukünftige Entwicklung abgeschätzt werden (siehe Kap. 6.1.2).

Tabelle 22: Aggregierte Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt in verschiedenen Studien

Quelle	Flotten- Bezugsjahr	NO _x	PM	CO	HC
		Werte in g/kWh*			
[Planco 2007]	2006	9,6	0,22	1,6	0,79
[CBS 2011]	2009	8,9	0,3	1,9	0,42
[TNO 2010]	2010	9,4	0,4	2	0,4
[TREMODO 5.3]	2010	11,3	0,36	2	0,85
Diese Studie	2011	10,3	0,26	1,9	0,51

*umgerechnet mit einem Verbrauch von 200 g Dieselkraftstoff pro kWh

6 Berechnung einer Zeitreihe von 1994 bis 2030

Im TREMOD-Modell werden Transportleistungs-, Energieverbrauchs- und Emissionsdaten für alle Verkehrsträger in einer Zeitreihe bereitgestellt. Hierdurch werden sowohl ein rückwirkender Vergleich als auch die Betrachtung von Zukunftsszenarien ermöglicht.

Die Aktualisierungen der Verkehrsmengen sowie der Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren für die Jahre 2010 bis 2012 konnte anhand differenzierter Daten, insbesondere der Güterstatistik des statistischen Bundesamtes, durchgeführt werden. Aufgrund der schlechteren Datenlage kann für die Bezugsjahre ab 1994 bis 2009 sowie das Szenario bis 2030 nur eine geringe Differenzierung erfolgen. Diese soll jedoch die hinsichtlich der Transportleistungen, des Energieverbrauchs und der Emissionen relevanten Entwicklungen abbilden.

6.1 Daten und Annahmen für die Zeitreihenberechnung

6.1.1 Rückschreibung von 1994 bis 2009

Zwischen 1994 und 2005 liegen als Daten des statistischen Bundesamtes die jährlichen Transportleistungen jeweils differenziert nach der Hauptverkehrsrichtung, der Schiffsflagge und der Wasserstraße vor. Hierbei zeigt sich vor allem eine Verlagerung der Transportleistung von Schiffen mit deutscher Flagge hin zu Schiffen mit niederländischer Flagge. Eine relevante Verschiebung der Transportleistung nach Flussgebieten fand seit 1994 kaum statt, der Anteil des Rheins lag weitgehend konstant bei etwa 80 %. Seit 2005 erlauben die Güterstatistiken weiterhin eine Unterteilung nach Schiffskategorien. Auch hier fanden aber keine nennenswerten Verschiebungen zwischen 2005 und 2009 statt.

Von Relevanz für die Energieverbrauchs- und Emissionsberechnung sind jedoch vor allem die technischen Merkmale der Flotte, insbesondere:

- Ein Anstieg der durchschnittlichen Tragfähigkeit der Binnenschiffe
- Die Altersverteilung der eingesetzten Motoren sowie deren spezifische Emissionsfaktoren

Um diese zu berücksichtigen, mussten aus den Bestandsdaten der Binnenschiffe Rückschlüsse auf die Aufteilung der Transportleistung getroffen werden. Bestandsdaten konnten aus dem Elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice (EWIS) bzw. niederländischen Statistiken [NLR 2012] entnommen werden. Da keine Statistiken aus dem Jahr 1994 verfügbar waren, wurden vereinfacht Daten aus dem Jahr 2012 verwendet und die Bestandsstruktur der Schiffe mit Baujahr 1990 und früher ausgewertet. Die getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Transportleistungsaufteilung nach Tragfähigkeitsklassen zeigt Tabelle 23. Für den Zeitraum zwischen 1990 und 2010 wurden die Anteile linear interpoliert.

Tabelle 23: Annahmen zum Anteil der Transporteistung 1990 nach Tragfähigkeitsklassen

Bezugsjahr	Kenngroße	<1500 t	1500-3000 t	>3000 t	Datenquelle
1990	Flotte	71%	27%	2%	ELVIS, NLR
	Transportleistung	32%	64%	4%	Eigene Annahme
2010	Flotte	62%	25%	12%	ELVIS, NLR
	Transportleistung	24%	53%	22%	DESTATIS

Der Energieverbrauch je Tragfähigkeitsklasse wurde auf Basis der mittleren spezifischen Verbrauchsfaktoren in g/tkm im Jahr 2010 angenommen. Eine Änderung der Auslastung der Schiffe wird nicht explizit berücksichtigt. Es wird jedoch angenommen, dass der spezifische Energieverbrauch sich seit 1994 reduziert hat, was über pauschale jährliche Korrekturfaktoren umgesetzt wird. Da keine detaillierten Informationen zum Energieverbrauch älterer Schiffe vorlagen, wurden die Korrekturfaktoren Top-Down über den Energieverbrauch (nach Energiebilanz) und die Transportleistung im Jahr 1993 abgeleitet. Somit nimmt der durchschnittliche Verbrauch der Binnenschiffsflotte zwischen 1993 bis 2010 um ca. 1,1 % pro Jahr ab.

Die spezifischen Schadstoffemissionen pro Bezugsjahr wurden entsprechend Kap. 4 über die Altersverteilung der Hauptmotoren und deren Emissionsfaktoren abgeleitet. Dabei wurde die Verteilung der Transportleistung auf die niederländische und die deutsche Flotte berücksichtigt.

6.1.2 Anpassungen für die Bezugsjahre vor 1993

Aufgrund der aktuellen Recherchen dieser Studie zu den Emissionsfaktoren und der Flottenzusammensetzung war auch eine Anpassung der Emissionsfaktoren für die Jahre 1960 bis 1993 erforderlich. Es wurde festgestellt, dass die bisherigen mittleren Emissionsfaktoren Unterschiede zu den aktuellen Erhebungen aufweisen. Für das Bezugsjahr 1994 ergaben sich durch die neuen Berechnungen folgende Unterschiede zum bisherigen pauschalen Ansatz⁴:

- Die NO_x-Emissionen im Jahr 1994 sind ca. 5 % niedriger als bisher
- Die PM-Emissionen im Jahr 1994 sind ca. 15 % höher als bisher
- Die HC-Emissionen im Jahr 1994 sind ca. 22 % niedriger als bisher
- Die CO-Emissionen im Jahr 1994 sind ca. 40 % höher als bisher

Um die Ergebnisse für die Zeitreihe in TREMOD mit konsistenten Annahmen darzustellen und die aktuelle Datenlage zu nutzen, wurden die Emissionsfaktoren für die Jahre 1960 bis 1993 daher aktualisiert. Hierfür wurde wie folgt vorgegangen:

- Für die Jahre 1960 bis 1969 werden für die gesamte Binnenschifffahrt die Emissionsfaktoren für die Motoraujahrreihe ‚vor 1970‘ verwendet.
- Zwischen 1970 und 1993 wird zwischen den Emissionsfaktoren für Motoren ‚vor 1970‘ und den durchschnittlichen Emissionsfaktoren der Flotte im Jahr 1994 linear interpoliert.

Der Energieverbrauch und die Transportleistung für die Bezugsjahre 1960 bis 1993 wurden gegenüber TREMOD 5.3 nicht geändert.

6.1.3 Entwicklung bis 2030

Auf Basis der aktuellen Verkehrsprognose (VP25) der Bundesverkehrswegeplanung wird davon ausgegangen, dass die Gütertransportleistung der Binnenschifffahrt in den kommenden Jahren ansteigt. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 und einer entsprechenden Reduktion wird wie bisher in TREMOD bis zum Jahr 2030 gegenüber 2010 ein Wachstum von ca. 40 % angenommen [IFEU 2012]. Aus heutiger Sicht scheinen diese Prognosen zwar zu hoch, da zum Zeitpunkt dieses Berichts jedoch noch

⁴ Für die Bezugsjahre von 1960 bis 1990 wurde in TREMOD bisher (bis Version 5.3) ein konstanter Emissionsfaktor je Schadstoff angenommen, von 1990 bis 2004 werden pauschale Veränderungsraten angenommen, die vor allem die SO₂-Emissionen betreffen

keine aktuellere offizielle Verkehrsprognose (VP30) vorlag, werden die VP25 als Basis beibehalten.

Die Tendenz der letzten Jahre zeigt, dass der Binnenschiffsverkehr zunehmend von größeren Schiffen durchgeführt wird. Für die zukünftige Entwicklung der Binnenschifffahrt wird davon ausgegangen, dass die Anzahl größerer Schiffe weiter zunimmt, während ein Großteil kleinerer und älterer Schiffe verschrottet wird. Hierfür wird auf Prognosen von [Panteia 2013] für die Flottenbestände in Europa zurückgegriffen. Wie bei der Rückschreibung von 1994 bis 2009 wird angenommen, dass die Änderungsraten der Flottenanteile auf den Anteil der Transportleistung übertragen werden können (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24: Annahmen zum Verkehrsmengengerüst 2030 nach Tragfähigkeitsklassen

Bezugsjahr	Kenngröße	<1500 t	1500-3000 t	>3000 t	Datenquelle
2010/	Flotte (EU)	68%	29%	3%	Panteia 2013
2012	Transportleistung (D)	24%	53%	22%	DESTATIS
2030	Flotte (EU)	55%	40%	5%	Panteia 2013
	Transportleistung (D)	15%	54%	31%	Eigene Annahme

Neben der Entwicklung der Transportleistung sollen vor allem Potenziale zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs, sowie eine mögliche Verschärfung der Emissionsgrenzwerte, abgebildet werden.

Eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauches bei Binnenschiffen kann dabei sowohl durch technische als auch betriebliche Maßnahmen erfolgen. Möglichkeiten und Potenziale zur Senkung des Kraftstoffverbrauches und der CO₂-Emissionen wurden in Aktivitäten der ZKR untersucht [ZKR 2012]. Diese umfassen z.B. verbesserte Motoren und Propeller, eine Optimierung der Reiseplanung, „Smart Steaming“⁵, u.a.. Aus den Einzelpotenzialen aller Maßnahmen wurden von der ZKR in einer summarischen Grobabschätzung die gesamten Reduktionspotenziale für den Zeitraum 2010 bis 2050 in Form eines konservativen und eines optimistischen Szenarios abgeschätzt. Für das TREMOD-Szenario wurden die Potenziale des konservativen Szenarios übernommen und auf den Zeitraum bis 2030 angewendet. Damit ergibt sich eine spezifische Verbrauchsreduktion von 0,75 % pro Jahr bzw. von insgesamt 15 % zwischen dem Jahr 2010 und 2030 (Tabelle 25).

Tabelle 25: Zukünftige Kraftstoffverbrauchsreduktion in der Binnenschifffahrt

	[ZKR 2012]*	Annahme für TREMOD
Zeithorizont	2010 bis 2050	2010 bis 2030
Technische Maßnahmen	20%	10%
Betriebliche Maßnahmen	10%	5%
Gesamtpotenzial		15%
* konservatives Szenario, ohne Einfluss der Tragfähigkeitsvergrößerung Hinweis: Das Gesamtpotenzial ergibt sich aus der Multiplikation der Einzelpotenziale		

⁵ Programm des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Umwelt zur Senkung der CO₂-Emissionen in der Binnenschifffahrt durch eine Änderung der Verhaltensweisen beim Führen von Schiffen.

Auf eine Berücksichtigung des Reduktionspotenzials durch eine Vergrößerung der Tragfähigkeit wie in [ZKR 2012] wird im Rahmen des Szenarios verzichtet. Zwar konnte in dieser Studie festgestellt werden, dass das Verhältnis von Verbrauch zur Tragfähigkeit mit zunehmender Größe abnimmt. Dieser potenzielle Vorteil entfällt in der Praxis aber weitgehend aufgrund einer geringeren durchschnittlichen Auslastung größerer Schiffe (vgl. Kap. 5.1.3).

Eine größere Veränderung und Abhängigkeit der Tragfähigkeitsklassen ist bei der Entwicklung der Schadstoffemissionen zu erwarten. Um diese zu berechnen, wurden die spezifischen Emissionsfaktoren entsprechend Kap. 4 über ein Motorenumschichtungsmodell abgeleitet. Hierfür wurde die mittlere Altersverteilung der Motoren im Zeitraum von 2005 bis 2011 fortgeschrieben und mit den Absterberaten der jeweiligen Motorbaujahressklassen verknüpft. Die bisherigen Trends des Motorenaustauschs wurden jedoch für die Fortschreibung abgeschwächt, da davon ausgegangen wird, dass bisherige Subventionen wie das Motorenförderprogramm⁶ zu überdurchschnittlich hohen Austauschraten geführt haben. Somit wird ein jährlicher Anteil neuer Motoren an der Flotte von 1 % bei Schiffen <1500 t, 2,5 % bei 1500-3000 t und 4 % bei Schiffen über 3000 t angenommen.

Ein weiterer Einflussfaktor der Schadstoffemissionen sind die spezifischen Emissionen der Motoren in g/kWh. Aktuell werden Binnenschiffsmotoren noch über die Emissionsgrenzwertgesetzgebungen der EU-Richtlinie 97/68/EG mit der Stufe IIIA sowie durch die RheinSchUO mit der Stufe ZKR II typgenehmigt. Eine Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für zukünftige Motoren wird jedoch im Rahmen der Revision der Richtlinie 97/68/EG diskutiert [COM 2013]. In einem Impact Assessment der EU-Kommission wurden hierbei verschiedene Grenzwertszenarien untersucht [Panteia 2013]. Dabei wird eine schrittweise Verschärfung über eine Stufe IIIB und IV sowie eine anschließende Stufe V vorgeschlagen, welche vor allem eine drastische Reduktion der spezifischen PM- und NO_x-Emissionen vorsieht. Für das TREMOD-Szenario werden hiervon die vorgeschlagenen Grenzwerte für die Stufen IV und V übernommen. Als Einführungszeitraum für die Stufe IV wird das Jahr 2020, für die Stufe V das Jahr 2025 angenommen. Eine Übersicht der sich hieraus ergebenden Emissionsfaktoren zeigt Tabelle 26.

Tabelle 26: Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren im Szenario bis zum Jahr 2030

Baujahrklasse/ Emissionsstandard	CO	HC	NO _x	PM
	Werte in g/kWh			
2007 bis 2020 (ZKR II/St IIIA)	0,7	0,3	7	0,12
2020 bis 2025 (Stufe IV)	0,7	0,19	1,2	0,02
ab 2025 (Stufe V)	0,7	0,19	0,4	0,01

Hinweis: Als Emissionsfaktoren wurde entweder der vorgeschlagene Grenzwert oder falls niedriger, der Emissionsfaktor heutiger Motoren angenommen
Quelle: [Panteia 2013] und eigene Annahmen

⁶ Das derzeitige Förderprogramm in Deutschland läuft im Jahr 2016 aus (Richtlinie über Zuwendungen für die Beschaffung von emissionsärmeren Motoren von Binnenschiffen vom 21. Dezember 2012)

6.2 Ergebnisse für die Jahre 1980 bis 2030

Das Ergebnis für die Transportleistung und den Energieverbrauch der Zeitreihe für Deutschland zeigt Abbildung 21. Die gesamte Transportleistung hat sich demnach in den letzten 20 Jahren mit Ausnahme von temporären Tiefs in den Jahren 2002, 2009 (Wirtschaftskrise) und 2011 (Niedrigwasser) nur geringfügig geändert. Nach 2012 nimmt die gesamte Transportleistung entsprechend VP25 deutlich zu und verschiebt sich von den kleineren hin zu den größeren Tragfähigkeitsklassen. Der Energieverbrauch folgt einem ähnlichen Trend. Durch die angenommenen Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauches pro Tonnenkilometer sinkt dieser seit dem Jahr 1993 zunächst und nimmt erst nach 2012 wieder moderat zu.

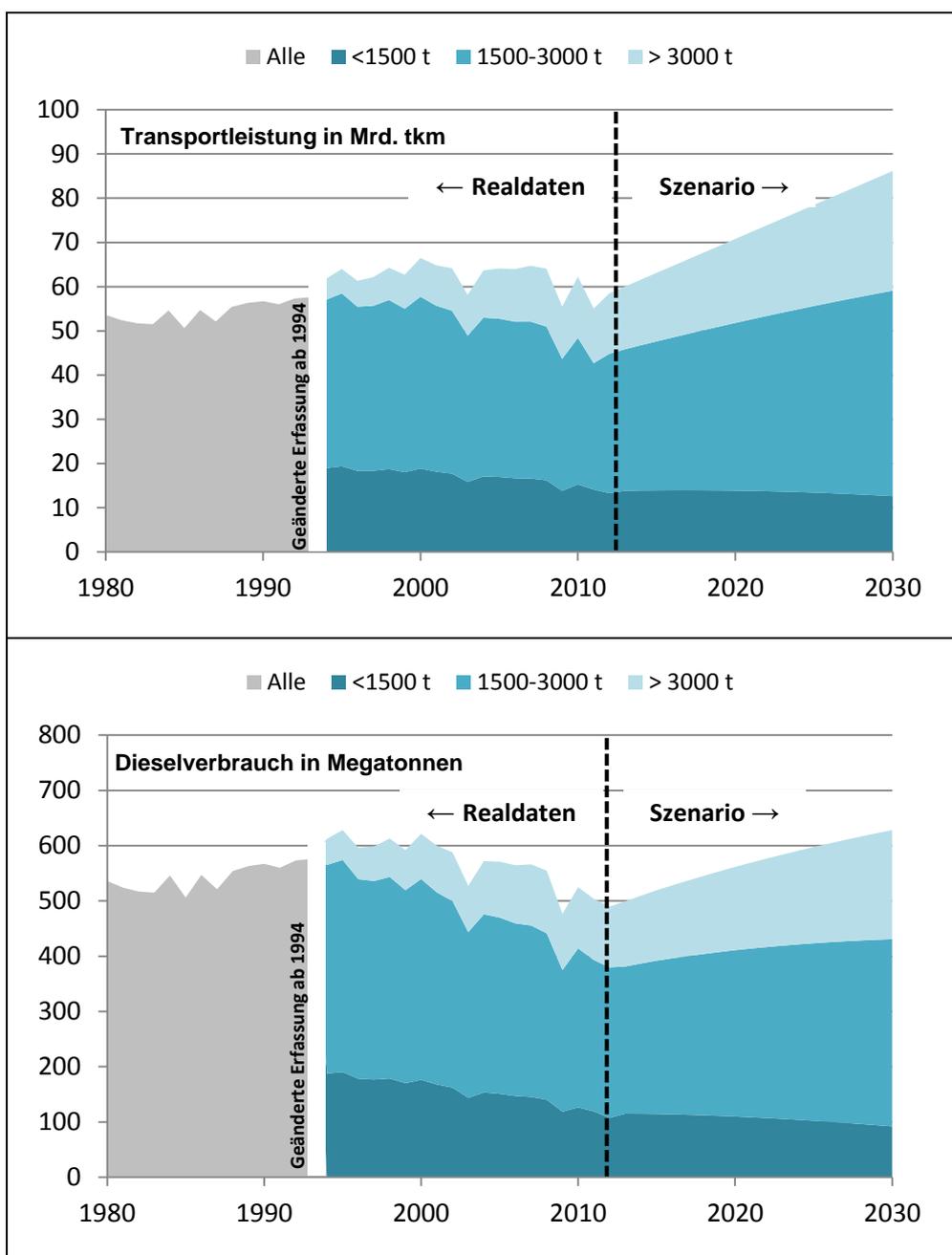


Abbildung 21: Transportleistungen und Dieserverbrauch der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen

Die spezifischen Emissionsfaktoren verzeichnen über die Zeitreihe hinweg stärkere Änderungen als die spezifischen Kraftstoffverbräuche. Die Schadstoffemissionen der Binnenschifffahrt sinken demnach zwischen 1990 und 2010 bei PM, HC und CO um ca. 50 %, bei den NOx-Emissionen nur um etwa 25 % (Abbildung 22 und Abbildung 23).

Im Szenario stagnieren die Emissionen zwischen 2012 und 2020 zunächst, da die Flotte sich zwar verjüngt, der Energieverbrauch insgesamt jedoch ansteigt. Danach führt die angenommene Grenzwertverschärfung im Jahr 2020 (hier als Stufe IV bezeichnet) jedoch zu einer drastischen Reduktion der Emissionen, da weitere Motoren bzw. Schiffe erneuert werden. Die NOx-Emissionen nehmen dabei zukünftig wesentlich stärker ab als die PM-Emissionen, auch, weil die NOx-Emissionen erst seit dem Inkrafttreten der Stufe ZKR I im Jahr 2001 bzw. Stufe ZKR II / IIIA im Jahr 2007 deutlich reduziert wurden.

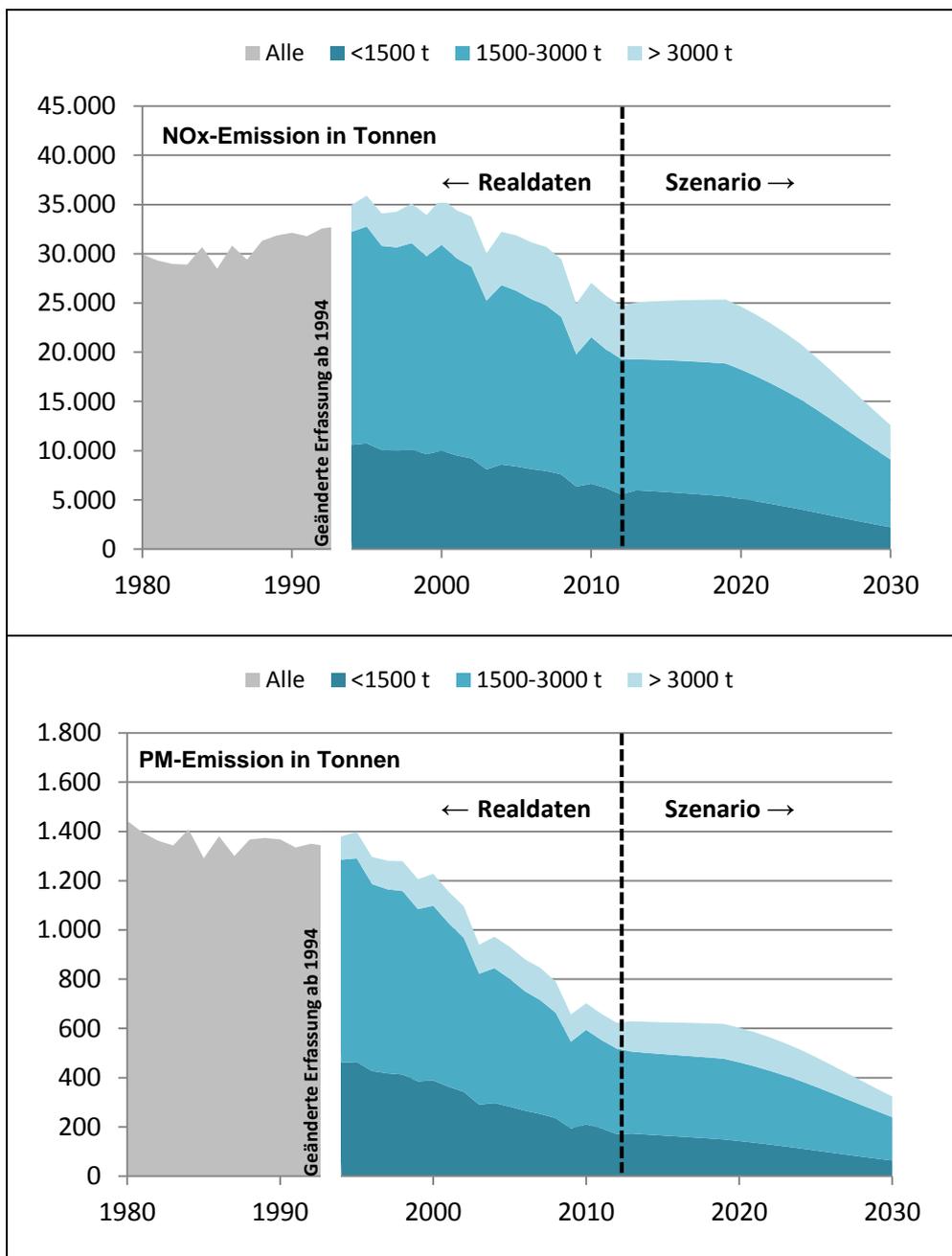


Abbildung 22: Stickstoffoxid (NOx)- und Partikel (PM)- Emissionen der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen

Aufgrund der geringeren Verschärfung der HC-Grenzwerte bzw. keiner Verschärfung beim Grenzwert für CO sind die Minderungen zwischen 2012 und 2030 geringer.

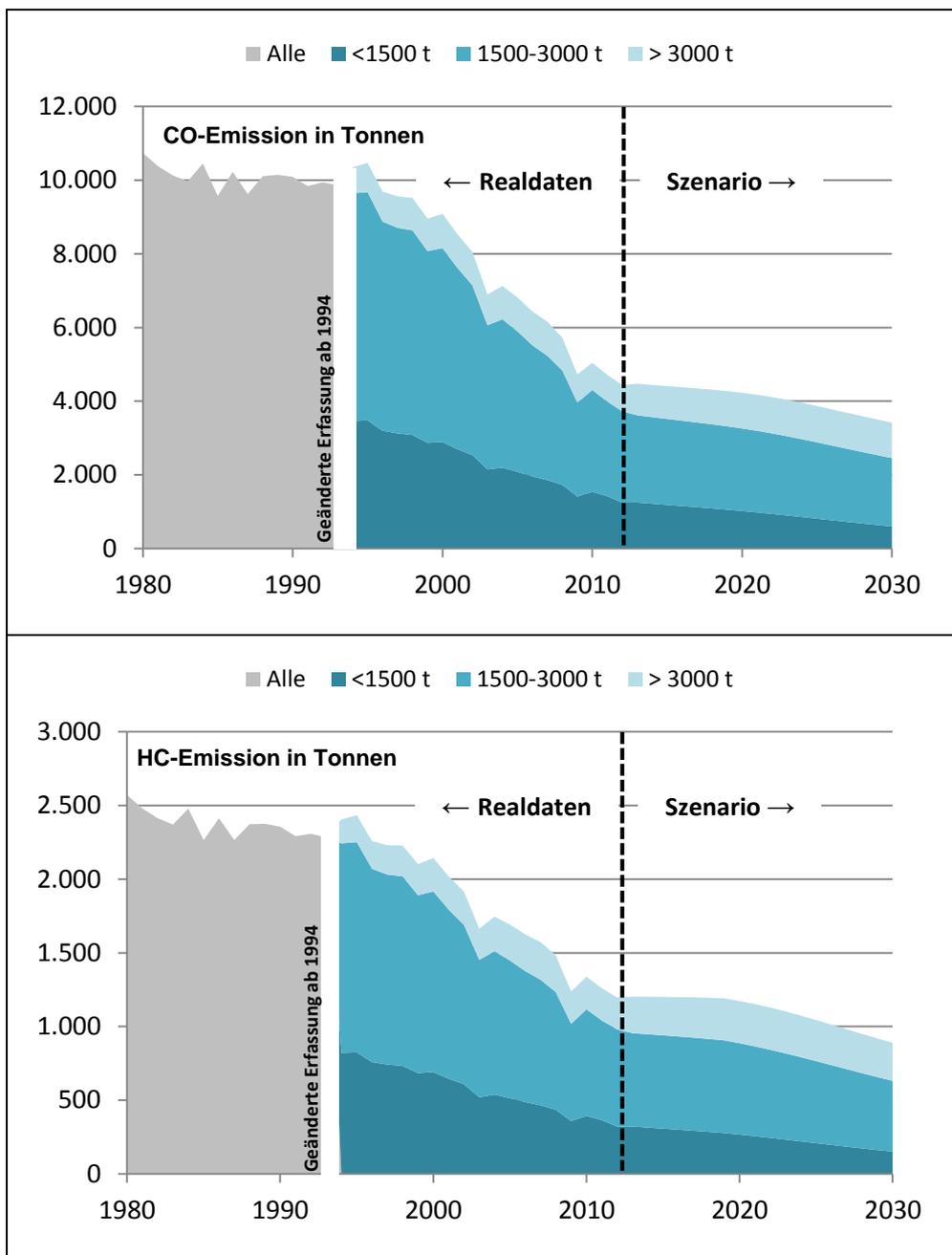


Abbildung 23: Kohlenmonoxid (CO)- und Kohlenwasserstoff (HC)-Emissionen der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen

7 Literaturverzeichnis

- BfG 2001** F. Grüttner, et al.: Erarbeitung von Verfahren zur Ermittlung der Luftschadstoffemissionen von in Betrieb befindlichen Binnenschiffsmotoren. Energie Umwelt Beratung e.V., und Germanischer Lloyd im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2001
- BMVBS 2011** Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Unterabteilung Wasserstraßen (Hrsg.): Kompendium Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) für Investitionen an Binnenschiffahrtsstraßen, Ausgabe 2011, Berlin
- CBS 2011** Air pollution, actual emissions by mobile sources, <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLLEN&PA=80448eng&D1=a&D2=8,13,17-20&D3=l&LA=EN&HDR=T&STB=G1,G2&VW=T> ; Statistics Netherlands, Den Haag/Heerlen, 14.12.2011
- CE Delft 2011** den Boer, Otten, van Essen: STREAM International Freight 2011. Comparison of various transport modes on a EU scale with the STREAM database; CE Delft, Delft 2011
- COM 2013** Stakeholder Consultation on the revision of Directive 97/68/EC on emissions from non-road mobile machinery engines. European Commission – Enterprise and Industry Directorate General; January 2013
- DESTATIS 2013a** Fachserie 8, Reihe 4 Verkehr: Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2012; Erscheinungsweise monatlich und jährlich; Wiesbaden 2013
- DESTATIS 2013b** Differenzierte Datenabfrage zu Anzahl Fahrten, Schiffskilometer und Transportleistungen, 14.05.2013
- ELWIS 2011a** Verkehrsberichte der Wasser- und Schifffahrtsdirektionen; aus: Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS); Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: <http://www.elwis.de/Verkehrsstatistik/Verkehrsberichte/index.html>; Abfrage am 06.12.2011
- ELWIS 2011b** Klassifizierung der Binnenwasserstraßen; aus: Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS); Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: <http://www.elwis.de/Binnenwasserstrassen/Klassifizierung/index.html>; Abfrage am 06.12.2011
- ELWIS 2012** Bestand an Binnenschiffen in Deutschland 2011; aus: Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei (ZBBD), Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice (ELWIS); Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: <http://www.elwis.de/Verkehrsstatistik/zbbd/index.html><http://www.elwis.de/Aktuelles/index.html>; Abfrage am 29.09.2011
- EUROSTAT 2013a** Güterverkehr auf Binnenwasserstraßen, Europäische Kommission, Rubrik Verkehr: Haupttabellen Binnenschifffahrt; Online Datenbank, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/main_tables, Letzter Aufruf: 14.05.2013
- EUROSTAT 2013b** Energieverbrauch in Form von Dieselmotoren in der Binnenschifffahrt; Datenbank Energiestatistik - Versorgung, Umwandlung, Verbrauch, jährliche Daten; <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/database>, , Letzter Aufruf: 14.05.2013
- GDV 2010** Containerhandbuch / Container Handbook. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. <http://www.containerhandbuch.de>
- IFEU 1992** Höpfer, U.; Knörr, W.: Motorisierter Verkehr in Deutschland: Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in der DDR, Berlin (Ost) und der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1988 und in Deutschland im Jahr 2005. Erich Schmidt Verlag: Berlin, 1992.
- IFEU 2012** Knörr, W. et al.: Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoff-emissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011); Im Auftrag des Umweltbundesamtes; FKZ 360 16 037; Heidelberg, September 2012

- IFEU et al. 2010** EcoTransIT World: Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports : Methodology and Data Berlin ; Hannover ; Heidelberg : IFEU Heidelberg ; Öko-Institut ; IVE/RMCON, 2010
- Kranke, A.; Schmied, M.; Schön, A. D.:** Co2-Berechnung in der Logistik: Datenquellen, Formeln, Standards. München: Verlag Heinrich Vogel, 2011.
- NLR 2012** Niederländisches Schiffsregister – interne Datenauswertung für das Jahr 2012
- Oonk et al. 2003** Oonk, H., Hulskotte, J., Koch, R., Kuipers, G., van Ling, J. Methodiek voor afleiding van emissiefactoren van binnenvaartschepen, TNO-MEP R2003/437, versie 2, November 2003
- Panteia 2013** CONTRIBUTION TO IMPACT ASSESSMENT of measures for reducing emissions of inland navigation; Panteia - Research to Progress; financed by the European Commission; Zoetermeer, June 10, 2013
- Planco 2007** Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Schlussbericht, November 2007. Planco Consulting in Zusammenarbeit mit Bundesanstalt für Gewässerkunde, im Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.
- RheinSchUO** Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO), Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Ausgabe 2011
- TNO 2010** Denier van der Gon, H., Hulskotte, J. Methodologies for estimating shipping emissions in the Netherlands. A documentation of currently used emission factors and related activity data. BOP Report, 2010
- VBD 2001** Materialien Nr. 56; Emissionen luftverunreinigender Stoffe durch den Schiffsverkehr in Nordrhein-Westfalen - Ein Modell zur Berechnung der Schadstoffverteilung auf Wasserstraßen, in Schleusen und Häfen; Versuchsanstalt für Binnenschifffahrt e.V.; Duisburg 2001
- VBD 2004** Technische und wirtschaftliche Konzepte für flußangepaßte Binnenschiffe. Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschifffahrt Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.; Duisburg 2004
- WTZ 2011** Pittermann, R. WTZ: Interne Auswertung der Emissionsmessungen von 50 Motoren ab 450 kW; Dezember 2011
- ZKR 1999** Aktivitäten der Zentralkommission in den Jahren 1998 und 1999. BERICHT DER ZENTRALKOMMISSION FÜR DIE RHEINSCHIFFFAHRT (ZKR)
- ZKR 2011** CDNI - ÜBEREINKOMMEN ÜBER DIE SAMMLUNG, ABGABE UND ANNAHME VON ABFÄLLEN; IN DER RHEIN- UND BINNENSCHIFFFAHRT; Sekretariat der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt; Ausgabe 2011
- ZKR 2012** Möglichkeiten zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Treibhausgasemissionen in der Binnenschifffahrt; Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR); Bericht des Untersuchungsausschusses zur Herbsttagung 2012
- ZKR 2013** Kriedel, N.; Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR); Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und des Carbon Footprint der Binnenschifffahrt durch Auswertung der Daten des CDNI; Runder Tisch der ZKR am 24.04.2013, <http://www.ccr-zkr.org/13020137-fr.html>
- ZSUK 2013** Interne Auswertung von Daten zu im Rahmen von Typgenehmigungsverfahren eingebauten Motoren und Emissionsmessungen der Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/ Schiffseichamt (ZSUK), Juni 2013

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Binnenschiffsflotte seit 1992 bis 2010 [ELVIS 2011a]	8
Abbildung 2: Altersstruktur der westeuropäischen Binnenflotte im Jahr 2008 [IVR 2009]	10
Abbildung 3: Vergleich des TOP-Down Energieverbrauchs anhand nationaler Energiebilanzen und Erhebungen im Rahmen des CDNI	20
Abbildung 4: Abhängigkeit der benötigten Leistung eines Großmotorschiffes (GMS) in Abhängigkeit der Wassertiefe und der Geschwindigkeit gegenüber Wasser bei 2,5 Meter Abladetiefe [PLANCO 2007]	22
Abbildung 5: Dieserverbrauch des Hauptmotors für Gütermotorschiffe und Schubverbände in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und des Gewässertyps entsprechend der Analysen der Vorstudie.....	24
Abbildung 6: Vergleich von Messwerten und Ergebnisse anderer Studien mit den Energieverbrauchswerten für Binnenschiffe der Vorstudie [ZKR 2012; eigene Darstellung].....	25
Abbildung 7: Vergleich von Messwerten und Planco-Werte mit den angepassten Energieverbrauchswerten für Binnenschiffe der Vorstudie [ZKR 2012; eigene Darstellung].....	26
Abbildung 8: Dieserverbrauch des Hauptmotors für Gütermotorschiffe in Abhängigkeit der Tragfähigkeit nach BMVBS-Kompodium „Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)“ sowie Vorstudie	29
Abbildung 9: Dieserverbrauch des Hauptmotors für Schubverbände in Abhängigkeit der Tragfähigkeit nach BMVBS-Kompodium „Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)“ sowie Vorstudie	30
Abbildung 10: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf freifließenden Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung.....	33
Abbildung 11: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf staugeregelten Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung.....	34
Abbildung 12: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen auf Kanälen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung	35
Abbildung 13: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf freifließenden Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung.....	36
Abbildung 14: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf staugeregelten Flüssen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung.....	37
Abbildung 15: Aktualisierung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden auf Kanälen in Abhängigkeit der Tragfähigkeit, der Beladung und der Fahrtrichtung	38
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren mit den Original-Datenquellen.....	43
Abbildung 17: Standard-Absterbekurve für Hauptantriebsmotoren	45
Abbildung 18: Altersverteilung der Motoren auf deutschen und niederländischen Schiffen	46

Abbildung 19: Anteil des Motorenbestands je Schicht nach Emissionsstandards im Jahr 2011	47
Abbildung 20: Durchschnittlicher Auslastungsgrad und Energieverbrauch nach Tragfähigkeitsklassen 2010 bis 2012.....	53
Abbildung 21: Transportleistungen und Dieserverbrauch der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen	60
Abbildung 22: Stickstoffoxid (NO _x)- und Partikel (PM)- Emissionen der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen	61
Abbildung 23: Kohlenmonoxid (CO)- und Kohlenwasserstoff (HC)-Emissionen der Binnenschifffahrt zwischen 1980 und 2030 nach Tragfähigkeitsklassen	62

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestand an Binnenschiffen in Deutschland 2010 nach Schiffsgattung und Tragfähigkeit (ohne Schub- und Schleppboote)	9
Tabelle 2: Bestand an Binnenschiffen in Deutschland 2010 nach Schiffsgattung und Alter	9
Tabelle 3: Merkmale des Containertransportes in Deutschland von 2010 bis 2012	13
Tabelle 4: Mittlere Auslastungsgrade von Containertransporten für konkrete Schiffstypen	13
Tabelle 5: Leerfahrten (alle Schiffe) an verschiedenen Schleusen	14
Tabelle 6: Leerfahrten in der WSV Südwest, unterteilt nach Schüttgütern und flüssigen Massengütern	15
Tabelle 7: Anteil zusätzlicher Leerfahrten nach Ladungsgütern und Fahrtrichtung	15
Tabelle 8: Anteil der Leichter in verschiedenen Schubverbänden	16
Tabelle 9: Verkehrsdaten des Binnenschiffsverkehrs in Deutschland für 2010 - DESTATIS	17
Tabelle 10: Verkehrsdaten des Binnenschiffsverkehrs in Deutschland für 2010 - aufbereitet.....	18
Tabelle 11: Nutzungsgrade NG_{Motor} der insgesamt vorhandenen Motorleistung der Binnenschiffe in Abhängigkeit von der Beladung und dem Gewässertyp	23
Tabelle 12: Beispieldatensatz für den Leistungsbedarf von Binnenschiffen in kW auf dem Wasserstraßenabschnitt Rhein 5 von Duisburg zur Grenze Niederlande (km 780-567) für eine Fahrt zu Berg bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h gegenüber Grund [BMVBS 2011].....	27
Tabelle 13: Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren nach RheinSchUO.....	41
Tabelle 14: Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren nach Richtlinie 97/38/EG	41
Tabelle 15: Übersicht der Datengrundlagen von Emissionsmessungen.....	42
Tabelle 16: Spezifische Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren in TREMOD	44
Tabelle 17: Vergleich des mittleren Alters für Binnenschiffsmotoren	47
Tabelle 18: Differenzierte Emissionsfaktoren in TREMOD für das Bezugsjahr 2011	48
Tabelle 19: Fahr-, Transportleistungen und Energieverbrauch nach Ladungsarten 2010 bis 2012	49
Tabelle 20: Transportleistung und Energieverbrauch nach Flussstraßen im Jahr 2012.....	51
Tabelle 21: Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland 2010-2012 im Vergleich mit TREMOD 5.3.....	54
Tabelle 22: Aggregierte Emissionsfaktoren der Binnenschifffahrt in verschiedenen Studien	55
Tabelle 23: Annahmen zum Anteil der Transportleistung 1990 nach Tragfähigkeitsklassen.....	56
Tabelle 24: Annahmen zum Verkehrsmengengerüst 2030 nach Tragfähigkeitsklassen	58
Tabelle 25: Zukünftige Kraftstoffverbrauchsreduktion in der Binnenschifffahrt.....	58
Tabelle 26: Emissionsfaktoren für Binnenschiffsmotoren im Szenario bis zum Jahr 2030.....	59
Tabelle 27: Kenndaten für die Berechnung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen nach Flusstypen, Beladungen und Fahrtrichtungen	75

Tabelle 28: Kenndaten für die Berechnung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden nach Flusstypen, Beladungen und Fahrrichtungen..... 76

10 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen	
AGEB	AG Energiebilanzen
ALG	Auslastungsgrad
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
B	Belgien
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	Deutschland
DESTATIS	Statistisches Bundesamt Deutschland
EU	Europäische Union
HC	Kohlenwasserstoffe
IVR	Internationale Vereinigung zur Wahrnehmung d. gemeinsamen Interessen der Binnenschifffahrt und der Versicherung und zur Führung des Binnenschiffsregisters in Europa
NL	Niederlande
NO _x	Stickstoffoxide
PM	Partikelmasse
TEU-km	Container-Kilometer
tkm	Tonnenkilometer (Einheit für die Transportleistung, Transportleistung)
TNO	Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung
TREMODO	Transport Emission Model
UBA	Umweltbundesamt
VDB	Die Versuchsanstalt für Binnenschiffbau
WSV	deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
WTZ	Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt
ZSUK	Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/ Schiffseichamt

11 ANHANG

11.1 Zusammenfassung des Workshops ‚Energieverbrauch und Emissionen der Binnenschifffahrt‘ am 15.11.12

11.1.1 Begrüßung und Projekthintergrund

Im Jahr 2011 führten IFEU und Öko-Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes eine Vorstudie durch mit dem Ziel, die aktuellen Datengrundlagen und Erkenntnisse zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland zusammenzustellen. Diese Arbeiten werden nun weitergeführt mit dem Ziel, eine verbesserte Methodik zur Energie- und Emissionsberechnung unter Einbindung des vorhandenen Expertenwissens und aller aktuellen Daten und Fakten mit TREMOD zu erstellen. Der Expertenworkshop soll dazu dienen,

- a) die Erkenntnisse aus der Vorstudie vorzustellen und zu diskutieren,
- b) die Datenbasis und Methodik für die Emissionsberechnung der Binnenschifffahrt abzustimmen,
- c) Anregungen aufzunehmen und zusätzliche Informationen zu gewinnen.

Herr Mönch vom Umweltbundesamt übernimmt die Diskussionsleitung und begrüßt die Teilnehmer. Herr Knörr vom IFEU gibt einen Überblick über das TREMOD-Modell.

11.1.2 Block 1: Schiffsaktivitäten

Präsentation Wolfram Knörr, IFEU

Herr Knörr stellt die Ergebnisse zur Ermittlung der Schiffsaktivitäten (zurückgelegte Strecke, tonnenkilometrische Leistung) aus der Vorstudie vor. Basis hierfür ist die **Binnenschiffsstatistik des statistischen Bundesamtes (DESTATIS)**, welche sich auf umfangreiche Befragungen der Schiffsführer in Häfen und Schleuseninformationen stützt.

Da die Statistik nicht alle gewünschten Merkmale und Werte enthält (u.a. ist die Schiffsstatistik nicht mit der Güterstatistik verknüpfbar), wurden in der Vorstudie **zusätzliche nötige Annahmen** getroffen. Hierzu gehören Anteile von Leerfahrten, die Auslastung der Tragfähigkeit und die Zusammensetzung von Schubverbänden.

Diskussion und Faktenklärung mit den Teilnehmern

Die Annahmen zu den **Leerfahrten und Auslastungen** werden als plausibel angesehen. Eine Differenzierung hinsichtlich der Schiffstyp- und -größe und Wasserstraßen wird von den Teilnehmern jedoch wenn möglich als sinnvoll erachtet. Auch wird angemerkt, dass längere Leerfahrten – mit Ausnahme von Verbänden – in der Praxis vermieden werden und die Schiffe möglichst bald wieder Ladung aufnehmen.

Die vorgeschlagene **Aufteilung der Schubverbände** auf Basis der Wasserstraßenklassen wird als mögliche Vorgehensweise angesehen, genauere Datenquellen sind den Teilnehmern nicht bekannt. Das Auftreten großer Schubverbände mit sechs Leichtern auf dem Rhein wird bestätigt, vor allem für Erztransporte zwischen Rotterdam und Duisburg. Für kleinere Wasserstraßen, vor allem in den neuen Bundesländern, wird eine Aufteilung unter Berücksichtigung von Verbänden mit kleineren Leichtern, z.B. der Elbe-Schubverband, vorgeschlagen. Eine diesbezügliche Differenzierung bei der deutschlandweiten Verbrauchs- und Emissionsberechnung sollte aber nur bei ausreichender Relevanz hinsichtlich des Verkehrsaufkommens vorgenommen werden. Dagegen stimmen die

Workshop-Teilnehmer überein, dass zusätzlich **Koppelverbände** in dem Berechnungsmodell berücksichtigt werden müssen. Diese würden zunehmend in der Binnenschifffahrt eingesetzt und weisen sehr niedrige spezifische Energieverbräuche auf.

Weiteres Vorgehen der Projektpartner

Für die **Gewinnung weiterer Informationen** wird vorgeschlagen, die Möglichkeiten der Binnenschiffsstatistik des statistischen Bundesamtes im Detail zu prüfen. Weitere Informationen zu den Verkehrsmengen können gegebenenfalls bei großen Unternehmen der Erzindustrie (z.B. Thyssen) oder Kohlekraftwerken gewonnen werden.

11.1.3 Block 2: Energieverbrauch

Präsentation Martin Schmied, INFRAS

Herr Schmied von INFRAS veranschaulicht die Grundlagen der Energieverbrauchsbeziehung für die Binnenschifffahrt anhand eines **Top-Down** und eines **Bottom-Up-Ansatzes**. Dabei erläuterte er ausführlich, wie in der Vorstudie für das Umweltbundesamt vorgegangen wurde und **welche Annahmen** hierbei getroffen wurden. Anschließend wird aufgezeigt, welche **Energieverbrauchswerte für verschiedene Schiffstypen** in Abhängigkeit der Tragfähigkeit berechnet wurden, und Ergebnisse einer ersten **deutschlandweiten Hochrechnung** werden vorgestellt.

Diskussion und Faktenklärung mit den Teilnehmern

Der aufgezeigte **Bottom-Up-Ansatz** wird von den Teilnehmern als **sinnvolle Grundlage** für die Berechnung der Emissionen der Binnenschifffahrt angesehen. Bezüglich des **Differenzierungsgrades** wird von den Projektpartnern betont, dass die Energieverbrauchsdaten des Berechnungsmodells dem nationalen Durchschnitt, nicht spezifischen Fallbeispielen, gerecht werden können. Bei den vorgesehenen Schiffsmerkmalen, wie den DESTATIS Schiffstypen und den Tragfähigkeitsklassen, gibt es keine Einwände. Es wird auch angemerkt, dass Schiffsbezeichnungen wie „Johann Welker“ sich in der Praxis aufgrund häufiger Umbauten deutlich unterscheiden können und somit keine sinnvolle Abgrenzung darstellen.

Die **zugrundeliegenden Berechnungsannahmen** werden ausführlich von den Experten diskutiert. Für den **Dieserverbrauch der Binnenschiffsmotoren** wird ein Mittelwert von 200 g/kWh als ausreichend für die Berechnung angesehen. Unterschiede zwischen dem Betrieb im Voll- und Teillastbereich sowie bei Langsam- und Schnellläufern werden zwar angesprochen, aber nicht als relevant für eine differenzierte bundesweite Berechnung angesehen. Auch für die **Hilfsmotoren** wird eine pauschale Annahme von 5 % des Verbrauchs der Hauptmotoren als ausreichend angesehen. Die bisher angesetzten **Lastfaktoren** für freifließende und staugeregelten Gewässer empfinden die Experten als zu hoch. Für eine Überarbeitung wird auf vorhandene Detaildaten der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) für verschiedene Gewässerabschnitte hingewiesen, aus denen sich genauere Lastfaktoren ermitteln lassen könnten.

Bei den **Ergebnissen der Vorstudie** wird der Energieverbrauch der Binnenschifffahrt von einigen Teilnehmern, trotz der Reduktion von ca. 10 % gegenüber den bisherigen Annahmen in TREMOD, tendenziell als weiterhin zu hoch eingeschätzt. Den Experten zufolge dürfte alleine durch den Anstieg der durchschnittlichen Tragfähigkeit der Energieverbrauch um 0,5-1,5 % pro Jahr sinken. Ebenso werden die **spezifischen Verbrauchswerte** pro Tonnenkilometer für verschiedene Schiffstypen diskutiert, da beispielhafte Werte, die von Herrn Pauli vorgestellt werden, ebenso wie von PLANCO erarbeitete Verbrauchswerte, deutlich niedriger als die in der Vorstudie ermittelten Durchschnittswerte

liegen. Aufgrund der nur bedingt gegebenen direkten Vergleichbarkeit der spezifischen Verbrauchswerte sollen die Projektpartner daher im weiteren Projektverlauf die Rahmenbedingungen (z.B. Lastfaktoren, Geschwindigkeiten, etc.) prüfen und die Werte auf einer einheitlichen Basis vergleichen.

Weiteres Vorgehen der Projektpartner

Im weiteren Vorgehen sollen die diskutierten Unterschiede bei den spezifischen Verbrauchswerten und deren Einflussfaktoren geprüft und plausibilisiert werden. Entsprechende Tabellen mit den schlussendlich verwendeten Werten sollen dem Bericht als Anhänge hinzugefügt werden. Weiterhin soll der Bedarf zusätzlicher Daten, die der WSV bzw. dem BMVBS vorliegen, durch die Projektpartner in Abstimmung mit PLANCO geprüft und formuliert werden.

11.1.4 Block 3: Emissionen

Präsentation Christoph Heidt, IFEU

Herr Heidt (IFEU) erläutert die **Methodik der Emissionsberechnung** der Binnenschifffahrt in TREMOD und stellt anschließend die Arbeiten der Vorstudie vor, in welcher aktuelle mittlere Emissionsfaktoren und detaillierte Messdaten aufbereitet wurden. Aus den **vorläufigen Ergebnissen** geht bereits eine deutliche Reduktion der Emissionen gegenüber der bisherigen TREMOD-Version hervor. Anschließend wird aufgezeigt, welche **Möglichkeiten einer detaillierten Emissionsberechnung** dem zukünftigen TREMOD-Modell zur Verfügung stehen und mit welchen Daten und Methoden diese umgesetzt werden umgesetzt können.

Diskussion und Faktenklärung mit den Teilnehmern

Die Teilnehmer stimmen überein, dass vor allem das **Alter der Hauptmotoren** die wichtigste Differenzierungsgröße für die spezifischen Emissionsfaktoren ist. Daher soll die **Verteilung der Motoren in der Binnenschiffsflotte** möglichst detailliert abgebildet werden, um die bestehenden Emissionsfaktoren zuzuordnen. Hierfür diskutieren die verschiedenen Experten die aktuelle **Datenverfügbarkeit**. Für die deutsche Flotte liegt nach Angaben der ZSUK erst seit 2003 das Baujahr der Hauptmotoren und auch nur für einen Teil des Schiffsbestandes vor. Als weitere wichtige Datenquellen werden die Schiffsregister der niederländischen Flotte genannt, welche in Deutschland den größten Anteil der Transportleistung ausmacht. Eine Modellierung der Altersverteilung der Motoren über mittlere Lebenszeiten (z.B. einen Mittelwert von 18 Jahren bzw. 30 Jahren für die Jahre vor 1990) wird als geeignete Ergänzung zu den verfügbaren Flottendaten sowie für die Prognose zukünftiger Emissionsfaktoren angesehen. Die Teilnehmer weisen hierzu auch auf eine Studie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) aus dem Jahr 2001 und die diesbezüglichen Arbeiten von PLANCO hin. Für aktuellere Daten werden auch Verkaufszahlen der Motorenherstellerverbände diskutiert, die aber aufgrund der Zwischenhändler als weniger hilfreich angesehen werden.

Weiteres Vorgehen der Projektpartner

Im weiteren Verlauf sollen die verfügbaren Daten der Projektpartner, darunter Emissionsmessungen und Flottenmerkmale ausländischer Flotten, weiter aufbereitet werden. Der zusätzliche Datenbedarf soll geprüft und die Verfügbarkeit mit den zuständigen Behörden, vor allem der ZSUK und dem BMVBS, geklärt werden.

11.1.5 Ausblick

Im Abschluss des Workshops wurden zukünftige Entwicklungen in der Binnenschifffahrt diskutiert, die in Energie- und Emissionsszenarien Beachtung finden sollten:

- Durch den verstärkten Einsatz von RIS (River Information Services) können Schiffsaktivitäten mittels **Schiffsidentifikation** zukünftig besser erfasst werden.
- Beim **Energieverbrauch** sind weitere Senkungen zu erwarten. Hierbei kommen sowohl Entwicklungen in der Antriebstechnologie, z.B. Hybridantriebe und Downsizing, als auch bei den eingesetzten Schiffstypen, z.B. über die weitere Vergrößerung der Tragfähigkeit und den zunehmenden Einsatz von Koppelverbänden zum Tragen. Auch können freiwillige Programme wie „Smart-Steaming“ oder Steuerungshilfssoftware für Schiffsführer zu Energieeinsparungen führen.
- Das Transportaufkommen der **Fahrgastschifffahrt** wird künftig vermutlich zunehmen. Auch hierbei besteht großes Innovationspotential z.B. für den Einsatz von vollelektrischen Antrieben oder Solarzellen. Die bisherige Bereitschaft zur Nachrüstung ist jedoch gering.
- Für die **Emissionsentwicklung** sind vor allem die aktuell diskutierten Emissionsgrenzwerte für Binnenschiffsmotoren von Relevanz. Ebenso wird eine Neuauflegung von Motorenförderungsprogrammen diskutiert, die für eine beschleunigte Flottenverjüngung und damit niedrigere Emissionen sorgen können.
- Der **Einsatz von LNG** (liquefied natural gas) in der Binnenschifffahrt wird derzeit stark diskutiert und bereits in Pilotprojekten umgesetzt (Ausnahmegenehmigung für vier Schiffe ab 2016/17). In den nächsten Jahren könnten die nötigen ZKR-Zulassungsvorschriften verabschiedet werden und dieser Kraftstoff einen stärkeren Gebrauch in der Binnenschifffahrt erfahren – mit wichtigen Auswirkungen auf die Emissionsentwicklung.

11.1.6 Teilnehmerliste

Funktion beim Workshop	Teilnehmer	Firma/ Institution
Moderator	Lars Mönch Stefan Binkowski Gunnar Gohlisch	Umweltbundesamt
Referent Referent	Wolfram Knörr Christoph Heidt	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Referent	Martin Schmied Benedikt Notter	INFRAS – Forschung und Beratung
	Gernot Pauli Benjamin Hofmann	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR)
	Frank Trosky	PLANCO Consulting GmbH
	Franz Gumholt	Zentralstelle Schiffsuntersuchungskommission/ Schiffseichamt (ZSUK)
	Horst Winter	Statistisches Bundesamt
	Sven Hermsdorf	Imperial Logistics International
	Volker Schlickum	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin
	Werner Kühlkamp	Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Trans- portsysteme e.V. (DST)
	Winfried Kliche	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtent- wicklung (BMVBS)

11.2 Verwendete Kenndaten für die Berechnung des Dieseler Verbrauchs der Hauptmotoren der Binnenschiffe

Tabelle 27: Kenndaten für die Berechnung des Dieseler Verbrauchs des Hauptmotors von Gütermotorschiffen nach Flusstypen, Beladungen und Fahrtrichtungen

	Einheit	Talfahrt		Bergfahrt	
		leer	voll beladen	leer	voll beladen
Freifließender Fluss					
Motorauslastung	%	25,0%	30,0%	30,0%	70,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	10,0	10,0	9,0	9,0
Schwellenwert	t	500	500	1000	1000
Faktor a		-0,000000188	-0,000000225	-0,000000250	-0,000000583
Faktor b		0,002880340	0,003456408	0,003840454	0,008961058
Staugeregelter Fluss					
Motorauslastung	%	20,0%	55,0%	42,5%	85,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	11,0	11,0	10,0	10,0
Schwellenwert	t	500	500	1000	1000
Faktor a		-0,000000136	-0,000000375	-0,000000319	-0,000000638
Faktor b		0,002094793	0,005760680	0,004896578	0,009793157
Kanal					
Motorauslastung	%			25,0%	32,5%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h			10,0	10,0
Schwellenwert	t			500	1500
Faktor a				-0,000000188	-0,000000244
Faktor b				0,002880340	0,003744442
Quellen: BMVBS-Kompodium; eigene Berechnungen.					

Tabelle 28: Kenndaten für die Berechnung des Dieserverbrauchs des Hauptmotors von Schubverbänden nach Flusstypen, Beladungen und Fahrrichtungen

	Einheit	Talfahrt		Bergfahrt	
		leer	voll beladen	leer	voll beladen
Freifließender Fluss					
Motorauslastung	%	10,0%	20,0%	45,0%	95,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	10,0	10,0	8,0	8,0
Schwellenwert	t	2000	2000	1000	1000
Faktor a		-0,000000021	-0,000000042	-0,000000118	-0,000000250
Faktor b		0,000875402	0,001750804	0,004924135	0,010395397
Staugeregelter Fluss					
Motorauslastung	%	20,0%	30,0%	45,0%	95,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h	11,0	11,0	10,0	10,0
Schwellenwert	t	2000	2000	1000	1000
Faktor a		-0,000000038	-0,000000057	-0,000000095	-0,000000200
Faktor b		0,001591640	0,002387460	0,003939308	0,008316317
Kanal					
Motorauslastung	%			22,5%	30,0%
Geschwindigkeit g. Grund	km/h			10,0	10,0
Schwellenwert	t			2000	2000
Faktor a				-0,000000049	-0,000000065
Faktor b				0,001998512	0,002664683
Quellen: BMVBS-Kompodium; eigene Berechnungen.					