

TEXTE

103/2025

Abschlussbericht

Ist-Analyse der VOC-Emissionen bei der Reinigung von Transportmitteln und Tanks

Ist-Analyse der VOC-Emissionen von Mineralölprodukten bei der Reinigung von Eisenbahnkesselwagen, Binnentankschiffen, Straßentankfahrzeugen, Pipelines, Lagertanks und Tankcontainern

von:

Dr. Till Zimmermann, Christian Tebert, Robin Memelink
Ökopol Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 103/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 36 302 3
FB001579

Abschlussbericht

Ist-Analyse der VOC-Emissionen bei der Reinigung von Transportmitteln und Tanks

Ist-Analyse der VOC-Emissionen von Mineralölprodukten
bei der Reinigung von Eisenbahnkesselwagen,
Binnentankschiffen, Straßentankfahrzeugen, Pipelines,
Lagertanks und Tankcontainern

von

Dr. Till Zimmermann, Christian Tebert, Robin Memelink
Ökopol Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Ökopol Institut für Ökologie und Politik GmbH
Nernstweg 32-34
22765 Hamburg

Abschlussdatum:

September 2024

Redaktion:

Fachgebiet III 2.1 - Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen
Karen Pannier
Fachgebiet V 1.6 - Emissionssituation
Christian Böttcher

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Ist-Analyse der VOC-Emissionen bei der Reinigung von Transportmitteln und Tanks

Schwerpunkt des Vorhabens ist eine Ist-Analyse der VOC-Emissionen aus der Innenreinigung von Transportmitteln (Tankcontainer/Transportbehälter, See- und Binnentankschiffe, Rohrleitungen (Pipelines), Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeuge) und der Tanks (Lagertanks in Raffinerien, Raffinerieferne Tanklager). Im Rahmen dieser Analyse erfolgt unter anderem eine Befragung von Akteuren und Experten*Expertinnen.

Die Bestimmung der Emissionen erfolgt auf Basis von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten, die für die verschiedenen emissionsrelevanten Aktivitäten im Rahmen der Analyse identifiziert werden. Auf dieser Basis werden Zeitreihen der Emissionen von 1990 bis 2021 erstellt. Ergänzend findet eine Abschätzung der Unsicherheiten statt.

Abstract: Analysis of Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from the interior cleaning of transportation vehicles and tanks

The focus of the project is on conducting an analysis of Volatile Organic Compound (VOC) emissions from the interior cleaning of transportation vehicles (tank containers/transport containers, sea and inland tankers, pipelines, railway tank cars, and road tank vehicles) and tanks (storage tanks in refineries, refinery-adjacent tank farms) in Germany. As part of this analysis, interviews with stakeholders and experts will be conducted.

The determination of emissions is based on emission factors and activity rates identified for various emission-relevant activities within the scope of the analysis. Using this information, time series of emissions are compiled from 1990 to 2021. Additionally, an assessment of uncertainties is conducted.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	12
Summary.....	15
1 Hintergrund und Zielstellung.....	18
2 Recherchen und Bestandsaufnahme.....	20
2.1 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager.....	20
2.1.1 Emissionsfaktor.....	21
2.1.2 Aktivitätsrate.....	24
2.2 Tankmotorschiffe.....	29
2.2.1 Emissionsfaktor.....	31
2.2.2 Aktivitätsrate.....	32
2.3 Eisenbahnkesselwagen.....	44
2.3.1 Emissionsfaktor.....	45
2.3.2 Aktivitätsrate.....	46
2.4 Tankwagen.....	48
2.4.1 Emissionsfaktor.....	49
2.4.2 Aktivitätsrate.....	50
2.5 Pipelines.....	53
2.5.1 Emissionsfaktor.....	53
2.5.2 Aktivitätsrate.....	53
3 Ableitung von Emissions-Zeitreihen.....	55
3.1 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager.....	55
3.2 Tankmotorschiffe.....	59
3.3 Eisenbahnkesselwagen.....	61
3.4 Tankwagen.....	63
3.5 Pipelines.....	65
4 Bewertung der Ergebnisse und Schätzung der Unsicherheiten.....	66
4.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.....	66
4.2 Bestimmung der oberen und unteren Grenze des Unsicherheitsbereiches.....	68
4.3 Vorgehen zur Bestimmung der Unsicherheitsbereiche.....	69
4.3.1 Aktivitätsdaten.....	69

4.3.2	Emissionsfaktoren.....	70
4.4	Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager	71
4.4.1	Unsicherheit des Emissionsfaktors	71
4.4.2	Unsicherheit der Aktivitätsdaten	72
4.5	Tankmotorschiffe	73
4.5.1	Unsicherheit des Emissionsfaktors	73
4.5.2	Unsicherheit der Aktivitätsdaten	73
4.6	Eisenbahnkesselwagen	74
4.6.1	Unsicherheit des Emissionsfaktors	74
4.6.2	Unsicherheit der Aktivitätsdaten	74
4.7	Tankwagen	75
4.7.1	Unsicherheit des Emissionsfaktors	75
4.7.2	Unsicherheit der Aktivitätsdaten	75
4.8	Pipelines	75
5	Quellenverzeichnis	76
A	Anhang – Raffinerien in Deutschland.....	79
B	Anhang – Experten*Expertinnenkonsultation	81
C	Anhang – Angaben in Emissionserklärungen zu Tanklagerreinigungen.....	82
D	Zeitreihen - Entwicklungen mit Emissionsrelevanz.....	83
D.1	Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager	83
D.2	Tankmotorschiffe	86
D.3	Kesselwagen.....	88
D.4	Tankwagen	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundsätzliches Vorgehen bei der Emissionsberechnung.....	18
Abbildung 2: Grundsätzliches Vorgehen bei der Emissionsberechnung.....	20
Abbildung 3: Messung der Lagertankgrößen	24
Abbildung 4: Emissionen bei der Reinigung durch Ventilation	29
Abbildung 5: Ursachen und Möglichkeiten des Ventilierens von Binnentankschiff tanks	29
Abbildung 6: Ansatz von Bauer et al. (2010) zur Quantifizierung der Ventilierungen.....	31
Abbildung 7: Transporte von Mineralölerzeugnissen	33
Abbildung 8: Beispiel Rhein – Duisburg-Ruhrort. Pegel-Vorhersage	36
Abbildung 9: Pegelkarte für Deutschland vom 04.08.2022	37
Abbildung 10: Gewichtsmäßige Auslastung ausgewählter Schiffsarten seit 2013 in %.....	38
Abbildung 11: Berechnung geplanter Werftaufenthalte von Tankmotorschiffen in 2021	43
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Ablaufs der Reinigung von Kesselwagen	45
Abbildung 13: Pipelines und Betreiber in Deutschland.....	54
Abbildung 14: Beispiele für gängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.....	66
Abbildung 15: Konfidenzintervall, obere und untere Grenze veranschaulicht am Beispiel Normal- und Lognormalverteilung	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten zur Reinigung von Raffinerietanks	22
Tabelle 2: Standard-Lagertankgrößen.....	23
Tabelle 3: Zeitreihe der Lagertankkapazität.....	25
Tabelle 4: Zeitreihe der Gesamt-Anzahl jährlich durchgeführter Tankreinigungen.....	26
Tabelle 5: Zeitreihe gereinigtes Tankvolumen	27
Tabelle 6: Zeitreihe des Versands von Erdöl und Mineralölerzeugnissen	33
Tabelle 7: Entwicklung von Schiffanzahl und Beförderungskapazität.....	35
Tabelle 8: Zeitreihe der Versendungen mit Tankmotorschiffen (ohne Berücksichtigung von Minderauslastungen)	38
Tabelle 9: Zeitreihe der Kapazitätsauslastung von Tankmotorschiffen	39
Tabelle 10: Zeitreihe der Versendungen mit Tankmotorschiffen (Berücksichtigung von Minderauslastungen).....	41
Tabelle 11: Zeitreihe - Reinigungen von Tankmotorschiffen wegen Produktwechsel	42
Tabelle 12: Zeitreihe relevanter Werftaufenthalte von Tankmotorschiffen	43
Tabelle 13: VOC-Emissionen pro gereinigtem Kesselwagen	45
Tabelle 14: Emissionsfaktoren der US-EPA für Kesselwagenreinigung.....	46
Tabelle 15: Zeitreihe Anzahl Kesselwagen, Kapazität und jährliche Reinigungsvorgänge	47
Tabelle 16: Emissionsfaktoren für Tankwageninnenreinigung der US-EPA.....	49
Tabelle 17: Zeitreihe - Bestand an Tankkraftfahrzeugen und Tankwagen.....	50
Tabelle 18: Zeitreihe - Reinigungsvorgänge von Tankwagen.....	52

Tabelle 19: Aufteilung der Emissionen nach Tanklagerkategorie und Berichtskategorie.....	56
Tabelle 20: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Tankreinigung – Ansatz 1.....	56
Tabelle 21: Zeitreihe VOC-Emissionen aus der Tankreinigung – Ansatz 2	58
Tabelle 22: Aufteilung der VOC-Emissionen nach Gütergruppen und Berichtskategorien	60
Tabelle 23: Zeitreihe VOC-Emissionen Tankmotorschiffe.....	60
Tabelle 24: Aufteilung der Emissionen aus der Reinigung von Kesselwagen auf die Berichtskategorien	62
Tabelle 25: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Reinigung von Eisenbahnkesselwagen.....	62
Tabelle 26: Aufteilung der Emissionen aus der Reinigung von Tankwagen auf die Berichtskategorien	64
Tabelle 27: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tankwagen.....	64
Tabelle 28: Vorgeschlagene Unsicherheitsbereiche des EMEP-Guidebooks für Aktivitätsdaten	70
Tabelle 29: Vorgeschlagene Unsicherheitsbereiche des EMEP-Guidebooks für Emissionsfaktoren	70
Tabelle 30: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Raffinerietanks und raffineriefern Tanklager.....	71
Tabelle 31: Berechnung der Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Rohöltanks (Raffinerien).....	72
Tabelle 32: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Tankmotorschiffe	73
Tabelle 33: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Tankmotorschiffe	74
Tabelle 34: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Eisenbahnkesselwagen	74
Tabelle 35: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Eisenbahnkesselwagen.....	75
Tabelle 36: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Tankwagen	75
Tabelle 37: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Tankwagen.....	75
Tabelle 38: Raffinerien, deren Emissionserklärungen vorlagen.....	79
Tabelle 39: Konsultierte Institutionen.....	81
Tabelle 40: Anteil der Reinigung von Raffinerietanks und raffineriefern Lagertanks mit Abfackeln	83
Tabelle 41: Reinigungsintervalle von Raffinerietanks und raffineriefern Lagertanks	84
Tabelle 42: Aus Reinigungsintervall, Anteil Fackelanschluss, Emissionen pro Reinigung resultierender kombinierter Emissionsfaktor	85
Tabelle 43: Zeitreihen der Emissionsfaktoren für die Ventilierung von Tankmotorschiffen in Abhängigkeit von der Kapazitätsentwicklung.....	86
Tabelle 44: Zeitreihe der Emissionsfaktoren für die Reinigung von Kesselwagen..	88
Tabelle 45: Aus Reinigungsverfahren und Emissionen pro Reinigung resultierender kombinierter Emissionsfaktor	89

Abkürzungsverzeichnis

a.n.g.	anderweitig nicht genannt
AR	Aktivitätsrate
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAG	Bundesamt für Logistik und Mobilität
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CDNI	La Convention relative à la collecte, au dépôt et à la réception des Déchets survenant en Navigation rhénane et Intérieure (Übereinkommen über die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen in der Rhein- und Binnenschifffahrt)
Concawe	Conservation of Clean Air and Water in Europe Wissenschaftlich-technischer Dachverband der europäischen Mineralölindustrie
Destatis	Bundesamt für Statistik
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe
EF	Emissionsfaktor
EFTCO	European Federation of Tank Cleaning Organisations
EG	Europäische Gemeinschaft
EKW	Eisenbahnkesselwagen
EM	Emission
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme – Leitfaden zur Luftschadstoffemissionsinventur
HuR	Hansen und Rosenthal
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - „Weltklimarat“
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
NEC Richtlinie	<i>National Emission Ceilings Directive</i> - Richtlinie 2001/81/EG über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (Nicht-Methan flüchtige organische Verbindungen)
TKW	Straßentankfahrzeug
UEG	Untere Explosionsgrenze
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen)
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compound (Flüchtige organische Verbindung)
WHO	World Health Organisation (Weltgesundheitsorganisation)
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
W.T.R.	Willicher Tankwagenreinigung

Zusammenfassung

Die Minderung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) ist insbesondere vor dem Hintergrund der Ozonproblematik ein national und international anerkanntes Umweltziel. In Deutschland erfolgt die nationale Berichterstattung der Emissionen durch das Umweltbundesamt. In diesem Vorhaben geht es um die Emissionsberichterstattung in der Kategorie:

- ▶ 1.B.2 der Berichterstattung („Öl und Erdgas und diffuse Emissionen aus der Energieerzeugung“) und die dazugehörigen Unterkategorien, die Daten zum Teilbereich der Tankinnenreinigung beinhalten:
 - 1.B.2.a.iv „Öl, Verarbeitung und Lagerung“,
 - 1.B.2.a.v „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ sowie
 - 2.B.10 „Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“ (einschließlich „Lagerung chemischer Produkte“).

Für die genannten Kategorien wurde während der Emissionsberichterstattung im Jahr 2021 deutlich, dass die entsprechenden Daten lückenhaft sind. Dies betrifft speziell:

- ▶ die Lagerung von Rohöl und Mineralölprodukten in Tanks und deren Reinigung sowie
- ▶ den Transport und Umschlag von Mineralölprodukten mittels Binnentankschiffen, Rohrleitungen, Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeugen sowie
- ▶ die Reinigung dieser Transportfahrzeuge und Transportinfrastrukturen.

Rohöle, Ottokraftstoffe und andere Mineralölprodukte werden gelagert, umgeschlagen und transportiert. Dabei werden VOC-Emissionen in die Atmosphäre freigesetzt.

Die Lagerung erfolgt in Lagertanks in Raffinerien und raffineriefernen Tanklagern sowie Tankcontainern.

Für den Umschlag und Transport kommen die Verkehrsträger:

- ▶ Tankmotorschiffe,
- ▶ Rohrleitungen (Pipelines),
- ▶ Eisenbahnkesselwagen (EKW) und
- ▶ Straßentankfahrzeuge (TKW)

zum Einsatz. Für Prüfungen und zu Reparaturzwecken werden die Tanks und Transportbehälter geleert und danach gereinigt.

Vor diesem Hintergrund ist **eine Ist-Analyse der VOC-Emissionen aus der Innenreinigung der Transportmittel und der Tanks** mittels Experten*Expertinnenbefragung und Literaturstudien durchgeführt worden. Auf dieser Basis wurden Abschätzungen der VOC-Emissionen aus den in Frage stehenden Aktivitäten abgeleitet.

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Emissionsberechnung stützt sich auf die Bestimmung der Aktivitätsrate und des Emissionsfaktors. Das Produkt von beidem sind die NMVOC Emissionen.

Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager

Die Tankreinigung in den einzelnen Raffinerien unterliegt unterschiedlichen Verfahren und Reinigungszyklen. Die Reinigung erfolgt i.d.R. in Verbindung mit einer Wartung der Tanks. Die Emissionen bei der Reinigung entstehen bei der Öffnung des vorher entleerten Tanks. Unterschiede ergeben sich hierbei in Abhängigkeit von Maßnahmen zur Abluftreinigung/ Nachverbrennung.

Nach Experten*Expertinneninterviews und Literaturrecherche wurden schließlich zwei mögliche Emissionsfaktoren aus einer Studie der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe zur Nutzung ausgewählt, wobei sich einer auf die Tankbodenfläche bezieht, der andere auf die Tankkapazität. Auf Basis von Statistiken zur Tanklagerkapazität des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle und ergänzend durchgeführten Akteursinterviews konnten als Aktivitätsrate Zeitreihen für die die „jährlich durchgeführten Tankreinigungen“ abgeleitet werden. Auf dieser Basis erfolgte die Berechnung der Zeitreihen der Emissionen.

Tankmotorschiffe

Die Reinigung der Tanks von Binnentankschiffen findet in der Regel bei Produktwechseln und zur Qualitätssicherung von neu verladenen Produkten auf Kundenwunsch sowie im Rahmen von Werftaufenthalten statt. Emissionen ergeben sich aus der Emission von Produktresten im Tank in die Luft.

Für den Emissionsfaktor zur Berechnung der Emissionen wird auf eine Studie von Bauer et al. (2010) zurückgegriffen. Dieser Emissionsfaktor wurde anhand der kapazitätsmäßigen Entwicklung von Tankmotorschiffen aktualisiert bzw. für die Zeitreihe angepasst.

Für die Aktivitätsrate wurde zum einen auf Basis verschiedener Statistiken (Destatis, WSV) und ergänzender Experten*Expertinnenschätzungen die Häufigkeit von Reinigungen aufgrund von Produktwechseln ermittelt. Die Anzahl der Werftaufenthalte wurde ebenfalls anhand von Statistiken und Angaben aus Studien bzw. von Experten*Expertinnen berechnet.

Eisenbahnkesselwagen

Die Reinigung von Eisenbahnkesselwagen wird i.d.R. in Kombination mit Reparaturarbeiten, vor Kesselprüfungen, bei einem Produktwechsel oder einem Wechsel des Mieters durchgeführt. Der zur Berechnung der Emissionen verwendete Emissionsfaktor (Emissionen pro Tankreinigung in kg) basiert auf der Studie von Bauer et al. (2010) und wurde unter Berücksichtigung der Kapazitätsentwicklung angepasst. Die Aktivitätsrate (Anzahl der Reinigungsvorgänge) musste mangels verfügbarer Statistiken auf Basis von Studien und Verbandsinformationen hergeleitet werden, die dann mit Experten*Expertinnenangaben zum Reinigungsintervall kombiniert wurde.

Tankwagen

Eine Reinigung von Tankwagen (Straßentankfahrzeuge und -anhänger) findet der Regel dann statt, wenn ein Wechsel zwischen nicht kompatiblen Produkten vorgesehen ist.

Der Emissionsfaktor für die Emissionen der Innenraumtankreinigung von Tankwagen (Straßentankfahrzeugen) wurde auf Basis von Experten*Expertinnenauskünften berechnet. Die Aktivitätsrate (Anzahl Reinigungsvorgänge) wurde auf Basis nationaler Statistiken (KBA, Bestand an Tankfahrzeugen und -hängern) in Kombination mit Experten*Expertinnen gestützten Annahmen zur Reinigungshäufigkeit bestimmt.

Pipelines

Für Rohöl-Pipelines ergaben die Gespräche mit Betreibern, dass die Reinigung der Leitungen zum einen im laufenden Betrieb durch die Verwendung von „Molchen“ erfolgt, die mit dem Rohöl durch die Leitungen gedrückt werden. Zum anderen erfolgt die Reinigung bei Wartungs- und Reparaturarbeiten zur vollständigen Entleerung der Rohrstücke ebenfalls durch die Verwendung von Molchen, die mit Stickstoff durch die Leitung gedrückt werden. VOC-Emissionen werden hierbei als vernachlässigbar eingeschätzt, da die Molche nur eine geringe Größe von etwas mehr als dem Rohrdurchmesser aufweisen und bei Rohrentleerung eine Gasableitung über Abscheider erfolgt.

Abschätzung von Unsicherheiten

Unter Berücksichtigung der Vorgaben von IPCC- und EMEP-Guidebook wurden die Unsicherheiten von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten exemplarisch für das Jahr 2021 abgeschätzt.

Für die Aktivitätsraten war dies jeweils der Wert des EMEP-Guidebooks für Experten*Expertinnenauskünfte, mit einer mittleren Unsicherheit von 65 %. Den Empfehlungen von IPCC- und EMEP-Guidebook folgend wurde für diese Größe des Unsicherheitsbereichs eine Lognormalverteilung angenommen.

Die Unsicherheiten für den Emissionsfaktor wurden jeweils dem Typ „D“ des Guidebooks mit einer Unsicherheit von 100-300 % zugeordnet. Es wurde auf dieser Basis von durchschnittlich 200 % ausgegangen und eine Lognormalverteilung angenommen.

Summary

Reducing emissions of volatile organic compounds (VOCs) is a nationally and internationally recognised environmental goal, particularly in light of the ozone problem. In Germany, national reporting of emissions is carried out by the Federal Environment Agency. This project is concerned with emissions reporting in the following categories:

- ▶ 1.B.2 of the reporting (oil and natural gas and fugitive emissions from fuel supply) and the associated “subcategories”, which include data on the sub-sector of internal tank cleaning:
 - 1.B.2.a.iv “Fugitive emissions oil - refining storage”,
 - 1.B.2.a.v “Distribution of oil products” and
- ▶ 2.B.10 “Other chemical industry / Storage, handling, transport of chemical products”.

During the reporting of emissions in 2021, it became clear that there are gaps in the data for these categories. This applies specifically to:

- ▶ the storage of crude oil and mineral oil products in tanks and their cleaning and
- ▶ the transport and handling of petroleum products by means of inland tank vessels, pipelines, rail tank cars and tank trucks and
- ▶ the cleaning of these transport vehicles and transport infrastructures.

Crude oils, petrol and other mineral oil products are stored, handled, and transported. This releases VOC emissions into the atmosphere.

Storage takes place in storage tanks in refineries and off-refinery tank farms as well as tank containers.

The following modes of transport are used for handling and transportation:

- ▶ Liquid cargo barges,
- ▶ Pipelines,
- ▶ rail tank cars (RTC) and
- ▶ tank trucks.

The tanks and transport containers are emptied for testing and repair purposes and then cleaned.

Against this background, an **actual analysis of VOC emissions from the internal cleaning of the means of transport and the tanks** was carried out using expert interviews and literature studies. Estimates of VOC emissions from the activities in question were derived on this basis.

The basic procedure for calculating emissions is based on determining the activity rate and the emission factor. The product of both is the NMVOC emissions.

Refinery tank farms and tank farms supplying refineries

Tank cleaning in the individual refineries is subject to slightly different procedures and cleaning cycles. Cleaning is usually carried out in conjunction with tank maintenance. The emissions

during cleaning occur when the previously emptied tank is opened. There are differences depending on the measures for exhaust air purification/afterburning.

Following interviews with experts and literature research, two possible emission factors from a study by the German Scientific Society for Sustainable Energy, Mobility and Carbon Cycles were finally selected for use, one relating to the tank floor area and the other to the tank capacity. Based on statistics on tank storage capacity from the Federal Office of Economics and Export Control and additional stakeholder interviews, time series for the "annual tank cleanings" were derived as an activity rate. The time series of emissions were calculated on this basis.

Liquid cargo barge

The tanks of inland tank vessels are usually cleaned during product changes and for quality assurance of newly loaded products at the customer's request as well as during shipyard visits. Emissions result from the emission of product residues in the tank into the air.

The emission factor used to calculate emissions is based on a study by Bauer et al. (2010). This emission factor was updated or adjusted for the time series based on the capacity development of motor tankers.

For the activity rate, the frequency of cleanings due to product changes was determined on the basis of various statistics (Destatis, WSV) and additional expert estimates. The number of shipyard visits was also calculated on the basis of statistics and information from studies and experts.

Rail tank cars

The cleaning of rail tank cars is usually carried out in combination with repair work, before boiler inspections, during a product change or a change of tenant. The emission factor used to calculate the emissions (emissions per tank cleaning in kg) is based on the study by Bauer et al. (2010) and was adjusted to take account of capacity development. Due to a lack of available statistics, the activity rate (number of cleaning processes) had to be derived on the basis of studies and association information, which was then combined with expert information on the cleaning interval.

Tank trucks

Tank trucks (tank vehicles and trailers) are usually cleaned when a change between incompatible products is planned.

The emission factor for the emissions of the interior tank cleaning of tank trucks (road tankers) was calculated on the basis of expert information. The activity rate (number of cleaning processes) was determined on the basis of national statistics (KBA, number of tank vehicles and trailers) in combination with expert-based assumptions on cleaning frequency.

Pipelines

For crude oil pipelines, discussions with operators revealed that the pipelines are cleaned during operation by using "pigs" that are pushed through the pipelines with the crude oil. On the other hand, cleaning is also carried out during maintenance and repair work to completely empty the pipe sections by using pigs that are forced through the pipeline with nitrogen. VOC emissions are estimated to be negligible here, as the pigs are only slightly larger than the pipe diameter and the gas is discharged via separators when the pipe is emptied.

Estimation of uncertainties

Taking into account the requirements of the IPCC and EMEP Guidebook, the uncertainties of emission factors and activity rates were estimated for the year 2021 as an example.

For the activity rates, this was the value of the EMEP Guidebook for expert information, with an average uncertainty of 65 %. Following the recommendations of the IPCC and EMEP Guidebook, a lognormal distribution was assumed for this size of the uncertainty range.

The uncertainties for the emission factor were each assigned to type “D” of the Guidebook with an uncertainty of 100 to 300 %. On this basis, an average of 200 % was assumed and a lognormal distribution was assumed.

1 Hintergrund und Zielstellung

Die Minderung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) ist insbesondere vor dem Hintergrund der Ozonproblematik ein national und international anerkanntes Umweltziel. Langfristiges Ziel ist die dauerhafte Unterschreitung einer bodennahen Ozonkonzentration von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, unterhalb der keine schädlichen gesundheitlichen Auswirkungen erwartet werden (WHO-Konvention).

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Reihe von internationalen Vereinbarungen getroffen, die u. a. Anforderungen an die Reduzierung der Nicht-Methan-VOC (NMVOC)-Emissionen enthalten, wie

- ▶ das UNECE Multikomponenten-Protokoll,
- ▶ die EG NEC-Richtlinien 2001/81/EG und 2016/2284/EU,
- ▶ die EG Decopaint-Richtlinie 2004/42/EG,
- ▶ die EG Lösemittelrichtlinie 1999/13/EG¹.

In Deutschland erfolgt die nationale Berichterstattung der Emissionen durch das Umweltbundesamt.

Das grundsätzliche Vorgehen der Emissionsberechnung erfolgt über Aktivitätsraten (AR) und Emissionsfaktoren (EF), deren Produkt die Emissionen (EM) darstellen (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Grundsätzliches Vorgehen bei der Emissionsberechnung



Quelle: Ökopol

In diesem Vorhaben geht es speziell um folgende Kategorie der Berichterstattung

- ▶ 1.B.2 der Berichterstattung („Öl und Erdgas und diffuse Emissionen aus der Brennstoffbereitstellung“) und die dazugehörigen Unterkategorien, die Daten zum Teilbereich der Tankinnenreinigung beinhalten:
 - 1.B.2.a.iv „Öl, Verarbeitung und Lagerung“,
 - 1.B.2.a.v „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ sowie
 - 2.B.10 „Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“ (einschließlich „Lagerung chemischer Produkte“).

Für die genannten Kategorien wurde während der Emissionsberichterstattung im Jahr 2021 deutlich, dass die entsprechenden Daten lückenhaft sind. Dies betrifft speziell:

¹ Inzwischen abgelöst durch die Richtlinie über Industrieemissionen (Richtlinie 2010/75/EU).

- ▶ die Lagerung von Rohöl und Mineralölprodukten in Tanks und deren Reinigung sowie
- ▶ den Transport und Umschlag von Mineralölprodukten mittels Binnentankschiffen, Rohrleitungen, Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeugen sowie
- ▶ die Reinigung dieser Transportfahrzeuge und Transportinfrastrukturen.

Rohöle, Ottokraftstoffe und andere Mineralölprodukte werden gelagert, umgeschlagen und transportiert. Dabei werden VOC-Emissionen in die Atmosphäre freigesetzt.

Die Lagerung erfolgt in Lagertanks in Raffinerien und raffineriefernen Tanklagern sowie Tankcontainern.

Für den Umschlag und Transport kommen die Verkehrsträger

- ▶ Tankmotorschiffe,
- ▶ Rohrleitungen (Pipelines),
- ▶ Eisenbahnkesselwagen (EKW) und
- ▶ Straßentankfahrzeuge (TKW)

zum Einsatz. Für Prüfungen und zu Reparaturzwecken werden die Tanks und Transportbehälter geleert und danach gereinigt.

Vor diesem Hintergrund zielt das ausgeschriebene Vorhaben darauf ab, **eine Ist-Analyse der VOC-Emissionen aus der Innenreinigung der Transportmittel und der Tanks** mittels Experten*Expertinnenbefragung und Literaturstudien durchzuführen, um auf dieser Basis konkrete Vorschläge zur Anpassung/Aktualisierung der Abschätzungen der VOC-Emissionen aus den in Frage stehenden Aktivitäten ableiten zu können.

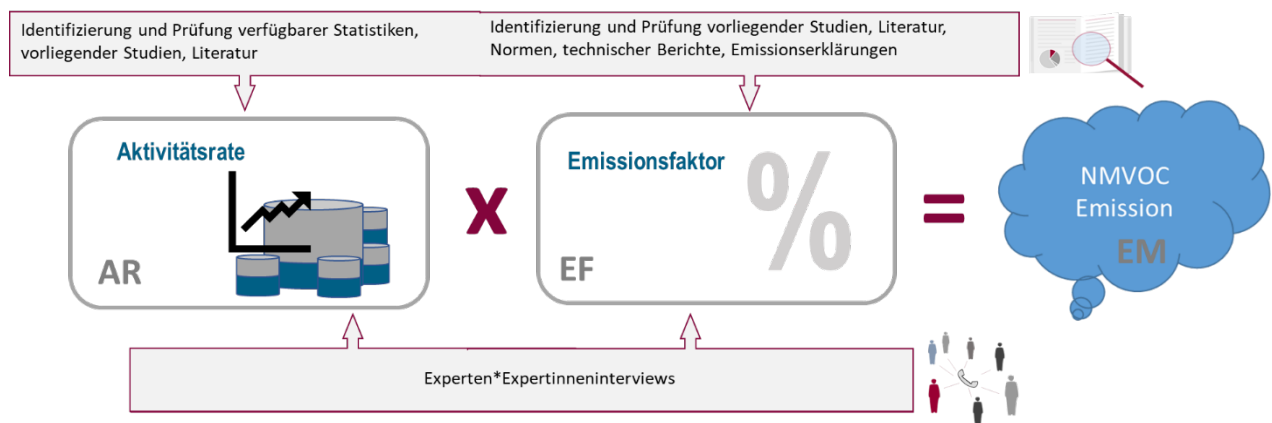
2 Recherchen und Bestandsaufnahme

Ziel der Arbeiten im ersten Arbeitspaket ist die Betrachtung der Ist-Situation bei der Innenreinigung von

- ▶ Lagertanks in Raffinerien und raffineriefernen Lagertanks,
- ▶ Tanks auf Tankmotorschiffen,
- ▶ Eisenbahnkesselwagen,
- ▶ Straßentankfahrzeuge und
- ▶ Rohrleitungen (Pipelines).

Im Ergebnis konkret gefragt sind Informationen zu Emissionsfaktoren bei der Reinigung in den benannten Anwendungen sowie zu Aktivitätsraten. Das Ziel schließlich ist die Berechnung dem Schema in Abbildung 2 folgend. Im zweiten Arbeitspaket („Ermittlung der VOC-Emissionen zwischen 1990 und heute“) ist dann die Zeitreihe der Emissionen zu ermitteln.

Abbildung 2: Grundsätzliches Vorgehen bei der Emissionsberechnung



Als Informationszugänge dienen Statistiken, Literatur, Normen und technische Berichte sowie Emissionserklärungen. Ergänzt werden diese Informationszugänge und Interviews mit Experten*Expertinnen.

2.1 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager

Die Reinigung von Tanks in Raffinerien und raffineriefernen Tanklagern ist kein standardisierter Prozess. Die Tankreinigung in den einzelnen Raffinerien unterliegt unterschiedlichen Verfahren und Reinigungszyklen. Die Reinigung erfolgt i.d.R. in Verbindung mit einer Wartung der Tanks. Die Wartungszyklen sind abhängig von der Bauweise der Tanks und der Schlammbelastung der gelagerten Stoffe. Zur Wartung (und Reinigung) wird der Tanks i.d.R. zunächst durch Abpumpen entleert. Die Emissionen bei der Reinigung entstehen bei der Öffnung des vorher entleerten Tanks. Unterschiede ergeben sich hierbei in Abhängigkeit von Maßnahmen zur Abluftreinigung/Nachverbrennung.

Für die Reinigung von Tanks an Tankstellen werden keine Emissionen angenommen, denn die Reinigung erfolgt nach Auskunft des Zentralverbandes des Tankstellengewerbes durch das „Auspumpen von am Boden angesammeltem Schlamm und Wasser, ohne dass dabei Emissionen entstehen“ (ZTG 2023).

2.1.1 Emissionsfaktor

Recherche und Datenerhebung

Zur Ableitung von Emissionsfaktoren für die Reinigung von Raffinerie-Lagertanks wurden zunächst die Emissionserklärungen der Raffineriestandorte in Deutschland ausgewertet (siehe Anhang A). Dazu lagen 22 Emissionserklärungen vor. Das Umweltbundesamt stellte Erklärungen der vier Berichtsjahre 2004, 2008, 2012 und 2016 bereit; von Raffinerien wurden weitere Erklärungen aus dem Jahr 2020 übermittelt.

Ergänzend wurden Experten*Expertinnengespräche geführt (siehe Anhang B).

Weiterhin wurde thematisch einschlägige Literatur und Normen ausgewertet:

- ▶ Bachmair, Josef (2008): Reinigung und Instandhaltung von Rohölproduktionstanks, unter Berücksichtigung von Verfahrenstechnik, Ökonomie und Ökologie, an einem Beispiel der Rohöl-Aufsuchungs-Aktiengesellschaft. Masterarbeit. Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben.
- ▶ Bender, Matthias (2009): Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCCC- und UNECE-Berichterstattung. Teilbericht Lageranlagen. Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- ▶ Concawe (2017): Air pollutant emission estimation methods for E-PRTR reporting by refineries. Unter Mitarbeit von A. Bakker, E. Benavente, B. Caamano, O. Duclaux, M. Durand, L. Fragu et al., Concawe, Brüssel.
- ▶ Mueller von, Gabriel; Bender, Matthias (2020): Emissionsfaktoren zu Raffinerien für die nationale Emissionsberichterstattung. Hrsg. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- ▶ Mueller-Heuser, Gerd; Altmann, Bernd-Rüdiger; Arp, Joachim; Schönwald, Henning (2000): Immissionsschutz und Arbeitsschutz bei der Reinigung von Rohöltanks (mit Berechnungsbeispielen), Fortschreibung. DGMK-Forschungsbericht 499-01. DGMK, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg.
- ▶ Theloke, Jochen; Kampffmeyer, Tatjana; Kugler, Ulrike; Friedrich, Rainer; Schilling, Stephanie; Wolf, Lennard; Springwald, Torsten (2013): Ermittlung von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten im Bereich IPCC (1996) 1.B.2.a. i-vi-Diffuse Emissionen aus Mineralöl und Mineralölprodukten. Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- ▶ VDI-Richtlinie 2440 (2021): Emissionsminderung Mineralölraffinerien.

In den Emissionserklärungen wurde geprüft, ob und wie Emissionen aus der Reinigung von Tanks berichtet werden. Die Untersuchung ergab, dass in den Emissionserklärungen nur von fünf der fünfzehn Raffinerien Emissionen aus der Reinigung berichtet werden (dokumentiert unter dem Betriebsvorgang "06 Reinigungsbetrieb"). Von zwei Raffinerien wurden die Tankreinigungsemissionen in jedem Berichtsjahr angegeben, während sie von den anderen drei Raffinerien nur für einzelne Berichtsjahre berichtet wurden.

In den Emissionserklärungen werden Emissionen aus der Reinigung jeweils mit Massenstrom [kg/h] und Reinigungsdauer [h/a] angegeben, die die Gesamtemission ergibt [kg/a]. Anhang C dokumentiert die in den Emissionserklärungen genannten Emissionen, die Reinigungsprozessen in Tanklagern zuzuordnen sind.

Auffällig sind die hohen Stundenzahlen der Reinigung, die berichtet werden (>1.000 Stunden, d.h. über mehrere Monate). Die hohen Stundenzahlen sind auf die teilweise sehr langwierigen Reinigungsarbeiten zurückzuführen, bei denen der Tank über längere Zeit außer Betrieb ist.

Die berichteten Massenströme bewegen sich zwischen 0,02 und 0,714 kg/h, wobei häufig 0,375 angegeben wird. Dieser Wert lässt sich auf die Angabe im Bericht von Concawe (2017) zurückführen. Die Gespräche mit den Raffinerien ergaben jedoch, dass der Wert nicht der tatsächlichen Reinigungspraxis angepasst wird, sondern als Fortschreibung des von Vorgängern eingetragenen Wertes erneut verwendet wird. Bei den Interviews wurde von verschiedenen Seiten als einzige verfügbare Berechnungsgrundlage für Emissionen die Angabe in der DGMK Studie angeführt (Mueller-Heuser et al. 2000). Diese gibt einen Emissionsfaktor von maximal² 0,5 kg VOC pro m² Tankbodenfläche an.

Die Emissionserklärungen wurden hinsichtlich der Angaben zu den Tankgrößen untersucht. Während gelegentlich die Größe der gesamten Lagerfläche aller Tanks dokumentiert ist [m²], werden die Flächen oder Volumina der einzelnen Tanks nur selten angegeben.

Die Experten*Expertinnengespräche und die Literaturlauswertung zur Reinigungspraxis haben ergeben, dass die durchgeführten Reinigungsprozesse weitgehend nicht standardisiert sind. Die Tankreinigung in den einzelnen Raffinerien unterliegt unterschiedlichen Verfahren und Reinigungszyklen. Die Raffinerien gaben an, dass die in den Emissionserklärungen genannten Reinigungsdauern der Dauer der Außerbetriebnahme des Tanks entspricht und nicht nur die potenziell emissionsträchtige Abführung der enthaltenen Gase umfasst, die bis zum Erreichen der Explosionsschutz-Bedingungen für ein manuelles Arbeiten erfolgt. Da die Reinigung i.d.R. in Verbindung mit einer Wartung des Lagertanks durchgeführt wird, entsprechen die Stillstandszeiten nicht den Reinigungsaktivitäten. Die Lagertankwartung richtet sich nach der Bauart (Einfach- oder Doppelbodentank). Während bei Doppelböden ein Zyklus von 10 und mehr Jahren zulässig ist, werden Einfachbodentanks alle 5 Jahre gewartet. Aus Kostengründen werden immer mehr Tanks mit Doppelboden ausgestattet.

Der Gesamtzeitraum, in dem ein Lagertank im Rahmen einer Reinigung außer Betrieb ist, reicht – je nach Menge und Festigkeit des akkumulierten Schlamms – von einigen Wochen bis zu über einem Jahr. Zentrale Parameter zur Reinigung, die anhand der Emissionserklärungen und Experten*Expertinneninterviews erhoben wurden, sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1: Daten zur Reinigung von Raffinerietanks

Reinigungstätigkeit	Min.	Max.
Reinigungszyklus	5 Jahre	15 Jahre
Außerbetriebnahme	2 - 3 Monate	> 1 Jahr
Typische Reinigungszeit	4 Wochen	6 Monate

Quelle: Auswertung von Emissionserklärungen und Experten*Expertinneninterviews

Die Emissionen bei der Reinigung entstehen bei der Öffnung des vorher entleerten Tanks. Bei den heute meist üblichen Schwimmdächern wird das Gasvolumen dadurch verkleinert, dass das Schwimmdach bis auf die Höhe von im Tank enthaltenen Stützen abgesenkt wird. Beim Öffnen des Tanks sind gemäß TA Luft (2002/2021) Nr. 5.2.6.7 und Nr. 5.4.9.2 spätestens seit 1. Oktober 2014 mit dem Auslaufen der Sanierungsfrist für bestehende Anlagen die entstehenden Abgase

² Hierzu heißt es bspw. „Seit [...] 1997 hat sich der Stand der Rohöltankreinigungstechnik fortentwickelt, so dass Kohlenwasserstoffemissionen von $\leq 0,5$ kg je m² Tankbodenfläche [...] sicher einhaltbar erscheinen“ (Mueller-Heuser et al. 2000.)

einer Nachverbrennung zuzuführen „oder es sind gleichwertige Maßnahmen zur Emissionsminderung durchzuführen“. Die Abführung der Gase erfolgt so lange, bis mindestens Werte unterhalb von 20 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) erreicht werden und manuelle Arbeiten im Tank zulässig sind.

Die Experten*Expertinneninterviews ergaben, dass in der Praxis noch häufig eine Tanköffnung ohne Anschluss an mobile Fackelanlagen erfolgt, um durch natürliche Belüftung eine Gasentleerung und Unterschreitung der UEG-Werte zu erreichen. Auf Basis der Gespräche wird geschätzt, dass in etwa 50 % der Tankwartungen ein Anschluss an eine mobile Fackelanlage stattfindet. Durch den Anschluss an mobile Fackeln werden die VOC-Emissionen auf etwa 0,5 % gemindert.

Ein weiterer relevanter Parameter für die Höhe der VOC-Emissionen ist die Dachausführung. Bei Schwimmdächern, die inzwischen überwiegen, lässt sich das Restvolumen des Tanks nach Absenken des Schwimmdachs auf etwa 40 % des ursprünglichen Volumens verringern.

Bezüglich der Art der Lagertanks ergaben die Experten*Expertinnengespräche, dass der Anteil der Lagertanks, die noch mit einem Einfach-Tankboden ausgestattet sind, rund 10 % beträgt; die übrigen Tanks sind mittlerweile mit einem Doppelboden ausgestattet.

Tanks mit Einfachboden sind nach § 46 der AwSV³ alle 5 Jahre zu überprüfen, Tanks mit Doppelboden sind gesetzlich nicht in festen Intervallen zu reinigen und werden im Durchschnitt alle 10 oder 15 Jahre überprüft.

Die Gespräche mit Raffinerien und Reinigungsbetrieben zu typischen Zyklen und Dauern ergaben, dass die Stilllegung von Rohöltanks vom (stark unterschiedlichen) Schlammgehalt des Rohöls abhängig ist. Bei stark schlammhaltigen Rohölen kann sich über die Jahre eine mehrere Meter hohe Schlammschicht im Tank bilden. Im Mittel werden Rohöltanks etwa nach sieben Jahren gereinigt und gewartet. Bei Produkttanks, in denen sich nur wenige Ablagerungen bilden, erfolgt die Stilllegung vorrangig zu Wartungszwecken im Abstand von im Mittel etwa 10 Jahren.

Beruhend auf den Emissionserklärungen und den Experten*Expertinnengesprächen lässt sich eine Systematisierung der Tankgrößen deutscher Raffinerien wie in Tabelle 2 vornehmen. Ergänzend wurde hierzu Online-Kartenmaterial zur Bestimmung von Tankbodenflächen ausgewertet, wie in Abbildung 3 veranschaulicht.

Tabelle 2: Standard-Lagertankgrößen

Tankgröße	Klein	Klein	Mittel	Durchschnitt	Groß
Inhalt [m ³]	5.000	10.000	35.000 bis 50.000	35.000	100.000
Durchmesser [m]	19	23	40	40	56
Höhe [m]	19	23	27,6 bis 40	40	40
Bodenfläche [m ²]	284	415	1.257	1.257	2.463

Quelle: eigene Datenerhebung

³ Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV): <https://www.gesetze-im-internet.de/awsv/AwSV.pdf>

Abbildung 3: Messung der Lagertankgrößen



Quelle: TIM-Online (29.11.2023)

Zusammenfassende Ableitung von Emissionsfaktoren

Als grundsätzlich geeignet erscheint der Emissionsfaktor der DGMK-Studie von 0,5 kg VOC je m² Tankbodenfläche.

Während sich dieser Emissionsfaktor auf die Bodenfläche bezieht, lässt sich anhand der Rechenbeispiele der DGMK-Studie auch ein Emissionsfaktor pro m³ Tankkapazität bei der Reinigung ableiten. Hier ergibt sich ein Faktor von 0,025 kg VOC je m³ Tankkapazität.

Der von Bender (2009) auf Basis einer Auswertung von Emissionserklärungen ermittelte Emissionsfaktor von 0,006 kg/m³ erscheint wenig belastbar, da die Auswertung von Emissionserklärungen zeigte, dass die Berichterstattung von Emissionen in der Reinigung bei den Raffinerien entweder gar nicht oder nicht entsprechend der tatsächlichen Emissionsvorgänge erfolgt.

2.1.2 Aktivitätsrate

Zur Ermittlung der Aktivitätsrate wurde das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) kontaktiert und Statistiken zur Tanklagerkapazität erfragt. Diese sind gegliedert nach Betreiber (Raffinerien, sonstige Tanklager, Kavernen, sonstige Mineralölverarbeiter) und bei den Raffinerien weiter nach Produkten (Rohöl, Halb- und Fertigprodukte). Die Statistik beinhaltet nach Information der BAFA nicht die Tanklager an Tankstellen oder Flughäfen. Tanklager für petrochemische Produkte sind laut Auskunft BAFA kein relevanter Teil dieser Statistik. Anhand der Tabellen für einzelne Jahrgänge (Daten für die Jahre 1990 bis 2021 lagen mit Ausnahme der Jahre 2000 und 1992 vor) konnten Zeitreihen aufgestellt werden.

Tabelle 3: Zeitreihe der Lagertankkapazität

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) [m ³]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) [m ³]	Sonstige Tanklager [m ³]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern [m ³]
2021	7.042.169	13.841.175	14.858.464	127.099
2020	7.044.369	13.646.175	15.221.879	127.099
2019	7.061.071	13.639.923	15.321.162	127.099
2018	7.123.371	13.718.838	15.381.407	125.399
2017	7.208.514	13.843.434	15.377.208	193.626
2016	7.201.122	13.676.398	15.378.379	193.296
2015	7.561.437	14.488.998	15.143.537	193.296
2014	7.511.659	14.750.686	15.099.519	193.296
2013	7.593.879	14.843.884	15.112.504	192.048
2012	7.764.248	14.884.004	15.662.224	192.048
2011	7.443.584	14.587.360	14.702.482	188.748
2010	7.730.482	14.759.197	15.764.446	188.748
2009	7.801.435	14.833.290	15.742.542	188.748
2008	7.819.725	15.915.048	16.011.740	188.748
2007	7.740.693	15.953.801	16.508.264	187.623
2006	7.870.321	16.160.840	16.827.220	187.723
2005	7.850.321	16.168.381	16.811.747	186.623
2004	7.730.682	16.188.920	17.022.553	182.623
2003	7.610.409	16.477.427	17.295.376	200.287
2002	7.590.409	16.522.827	17.354.284	200.207
2001	7.481.044	16.720.377	17.482.503	311.607
2000	*	*	*	*
1999	7.688.955	17.175.501	17.759.261	342.572
1998	7.891.780	17.059.908	18.344.401	974.150
1997	8.184.019	17.129.000	17.852.052	1.094.233
1996	8.460.911	19.133.129	15.620.447	302.152
1995	8.883.244	19.517.625	15.623.675	301.717
1994	8.823.310	19.584.423	15.364.372	301.382
1993	8.862.968	19.769.431	15.291.980	302.038
1992	*	*	*	*

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) [m³]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) [m³]	Sonstige Tanklager [m³]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern [m³]
1991	8.906.549	19.308.395	15.142.823	257.351
1990	8.179.788	18.972.124	15.099.193	257.764

*für die Jahre 1992 und 2000 liegen keine Daten zur Berechnung vor
Quelle: BAFA

Bezüglich der Zeitreihe der Lagertankkapazität fällt bei den Lägern bei sonstigen Mineralölverarbeitern auf, dass die Kapazität von 2017 nach 2018 deutlich zurückgeht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein großer Mineralölverarbeiter ein Lager „als nicht mehr relevant“ deklariert hat und dieses aus der Statistik entfernt wurde. Ein noch deutlicherer Sprung ist in den Jahren 1996-1999 festzustellen. Dieser konnte nicht von Seiten der BAFA aufgeklärt werden, mit Hinweis auf das Alter der betroffenen Daten.

Die folgende Zeitreihe der pro Jahr durchgeführten Tankreinigungen basiert auf den Experten*Expertinnengesprächen sowie auf Mueller-Heuser et al. (2000) mit folgenden Annahmen (die Zeitreihe der Reinigungsintervalle findet sich in Anhang D.1):

- ▶ durchschnittliche Lagertankkapazität 35.000 m³
- ▶ Reinigungsintervall für 2012 bis 2021: sieben Jahre bei Rohöl
- ▶ Reinigungsintervall für 2012 bis 2021: zehn Jahre bei Halb- und Fertigprodukten
- ▶ Reinigungsintervall 1990 bis 2011: fünf Jahre bei Rohöl
- ▶ Reinigungsintervall 1990 bis 2011: acht Jahre bei Halb- und Fertigprodukten
- ▶ lineare Interpolation zwischen den Jahren

Tabelle 4: Zeitreihe der Gesamt-Anzahl jährlich durchgeführter Tankreinigungen

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) (Anzahl)	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) (Anzahl)	Sonstige Tanklager (Anzahl)	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern (Anzahl)
2021	29	40	42	0,4
2020	29	39	43	0,4
2019	29	39	44	0,4
2018	29	39	44	0,4
2017	29	40	44	0,6
2016	29	39	44	0,6
2015	31	41	43	0,6
2014	31	42	43	0,6
2013	31	42	43	0,5
2012	32	43	45	0,5
2011	31	42	42	0,5

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) (Anzahl)	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) (Anzahl)	Sonstige Tanklager (Anzahl)	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern (Anzahl)
2010	32	43	46	0,5
2009	33	44	46	0,6
2008	34	47	47	0,6
2007	34	48	49	0,6
2006	35	49	51	0,6
2005	35	49	51	0,6
2004	35	50	52	0,6
2003	35	51	54	0,6
2002	36	52	55	0,6
2001	36	53	56	1,0
2000	*	*	*	*
1999	38	56	58	1,1
1998	39	56	60	3,2
1997	41	57	59	3,6
1996	44	64	52	1,0
1995	47	66	53	1,0
1994	47	67	52	1,0
1993	48	68	53	1,0
1992	*	*	*	*
1991	50	68	53	0,9
1990	47	68	54	0,9

Quelle: eigene Berechnungen

*für die Jahre 1992 und 2000 liegen keine Daten zur Berechnung vor

Zudem lässt sich daraus das gereinigte Tankvolumen ableiten (Tabelle 5):

Tabelle 5: Zeitreihe gereinigtes Tankvolumen

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) [m ³]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) [m ³]	Sonstige Tanklager [m ³]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern [m ³]
2021	1.006.024	1.384.118	1.485.846	12.710
2020	1.006.338	1.364.618	1.522.188	12.710
2019	1.008.724	1.363.992	1.532.116	12.710
2018	1.017.624	1.371.884	1.538.141	12.540

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) [m³]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) [m³]	Sonstige Tanklager [m³]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern [m³]
2017	1.029.788	1.384.343	1.537.721	19.363
2016	1.028.732	1.367.640	1.537.838	19.330
2015	1.080.205	1.448.900	1.514.354	19.330
2014	1.073.094	1.475.069	1.509.952	19.330
2013	1.084.840	1.484.388	1.511.250	19.205
2012	1.109.178	1.488.400	1.566.222	19.205
2011	1.077.361	1.472.119	1.483.737	6.427.445
2010	1.133.804	1.503.252	1.605.638	6.691.284
2009	1.159.673	1.524.918	1.618.392	6.609.785
2008	1.178.315	1.651.562	1.661.596	6.869.067
2007	1.182.606	1.671.351	1.729.437	6.953.740
2006	1.219.346	1.709.320	1.779.802	7.239.404
2005	1.233.622	1.726.720	1.795.429	7.286.297
2004	1.232.428	1.745.864	1.835.766	7.712.364
2003	1.231.096	1.794.571	1.883.655	7.593.220
2002	1.246.187	1.817.511	1.908.971	7.683.202
2001	1.246.841	1.857.820	1.942.500	7.766.378
2000	*	*	*	*
1999	1.321.539	1.947.737	2.013.937	8.041.653
1998	1.377.930	1.954.781	2.101.963	8.247.549
1997	1.452.003	1.983.358	2.067.080	8.346.936
1996	1.525.738	2.238.983	1.827.925	8.104.227
1995	1.628.595	2.308.536	1.847.962	8.232.131
1994	1.645.024	2.341.616	1.837.044	8.293.863
1993	1.680.908	2.389.711	1.848.481	8.475.281
1992	*	*	*	*
1991	1.749.501	2.386.431	1.871.585	8.655.409
1990	1.635.958	2.371.516	1.887.399	8.634.860

Quelle: eigene Berechnungen

*für die Jahre 1992 und 2000 liegen keine Daten zur Berechnung vor

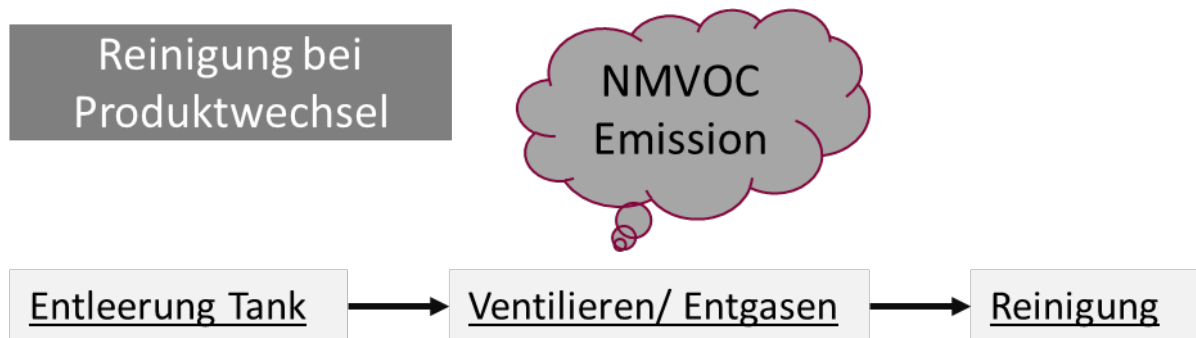
2.2 Tankmotorschiffe

Binnentankschiffe bzw. Tankmotorschiffe werden für den Transport (und die zeitweise Lagerung) von Ottokraftstoffen und Rohbenzin (Naphtha) eingesetzt (Bauer et al. 2010).

Eine Reinigung der Tanks von Binnentankschiffen findet i.d.R. bei Produktwechseln sowie zur Qualitätssicherung von neu verladenen Produkten auf Kundenwunsch statt. Grundsätzlich wird versucht Produktwechsel zu vermeiden und/oder kompatible Produkte zu transportieren. Daneben werden im Rahmen von Werftaufenthalten Tankreinigungen durchgeführt (CDNI 2014; Bauer et al. 2010; Verbandsauskunft BDB).

Relevante Emissionen im Zusammenhang mit der Reinigung ergeben sich aus der Emission von Produktresten im Tank in die Luft (OCIMF 2019; Buck et al. 2013; Bauer et al. 2010; Sauter 2009). Bei der Reinigung selbst werden i.d.R. keine lösemittelhaltigen Reinigungsmittel eingesetzt; die Tankreinigung erfolgt normalerweise durch Hochdruckreinigung oder Dampfreinigung.

Abbildung 4: Emissionen bei der Reinigung durch Ventilation

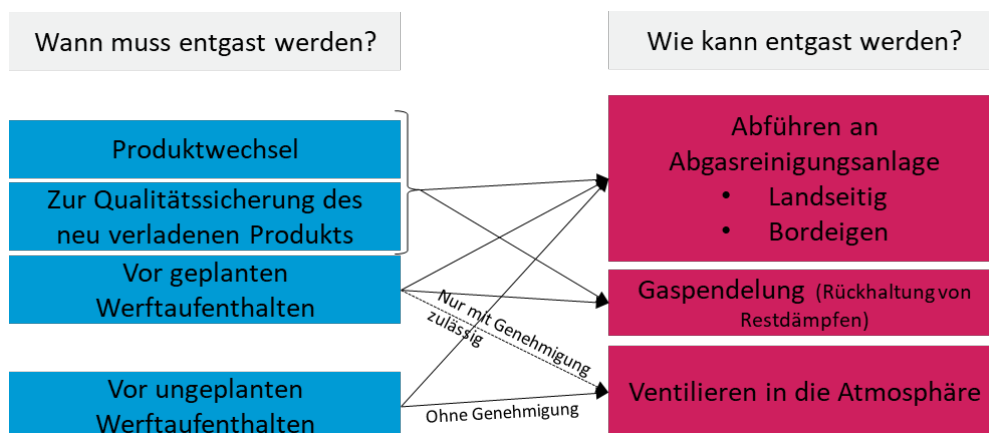


Quelle: Ökopool

Emissionen bei der Ventilation

Zum Bereich der Binnentankschiffe liegen zwei Studien von BiPRO (Bauer et al. 2010; Bauer und Greßmann 2014) vor. Diese betrachten das Ventilieren von Binnentankschiffentanks. So werden von Bauer et al. (2010) die Fälle, in denen ventiliert wird, strukturiert beschrieben, und den dann bestehenden Möglichkeiten gegenübergestellt (vgl. Abbildung 5). Auf die Reinigung der Tanks wird dabei in beiden Studien nicht explizit eingegangen.

Abbildung 5: Ursachen und Möglichkeiten des Ventilierens von Binnentankschiffentanks



Quelle: nach Bauer et al. 2010; Bauer und Greßmann 2014

In Bezug auf die Reinigung sind wie Eingangs beschrieben Produktwechsel sowie zur Qualitätssicherung von neu verladenen Produkten auf Kundenwunsch und ggf. geplante Werftaufenthalte relevant. Das Ventilieren vor ungeplanten Werftaufenthalten hingegen sollte i.d.R. nicht mit Reinigungsprozessen in Verbindung stehen.

Gemäß Bauer et al. (2010) war das Ventilieren in die Atmosphäre – auch vor geplanten Werftaufenthalten – jahrelang gängige Praxis, da für das Entgasen von Binnentankschiffen deutschlandweit zumindest zum Zeitpunkt der Studie keine Abgasreinigungseinrichtungen zur Verfügung standen. Gemäß der Antwort der Bundesregierung auf eine kleine Anfrage gibt es weiterhin keine entsprechenden festen Einrichtungen in Deutschland (BUND 2019). Dies entspricht auch der aktuell verfügbaren Bestandsaufnahme des CDNI mit Stand Juni 2021, in der entsprechende Einrichtungen nur in den Niederlanden und Belgien zu finden sind (CDNI 2021). Es gibt jedoch in Deutschland vereinzelte, nicht öffentliche Anlagen wie bspw. von BP in Lingen sowie mobile Entgasungsanlagen (bspw. in Duisburg im Einsatz) und eine geplante feste Anlage in Wesel.

Das CDNI ist ein Übereinkommen zwischen sechs EU-Staaten (Belgien, Frankreich, Deutschland, Luxemburg, den Niederlanden, Schweiz) mit Regeln für die Sammlung, Abgabe und Annahme von Abfällen. Die Vereinbarungen im Rahmen des CDNI umfassen auch ein schrittweises Entgasungsverbot, das in drei Phasen abläuft:

1. 6 Monate nach der Ratifizierung (in Deutschland 9. Februar 2021) gilt für die schädlichsten Güter ein Entgasungsverbot (Benzol, Benzin, Erdöldestillate und Gemische mit mehr als 10 % Ethanol);
2. 2 Jahre nach der Ratifizierung wird bei einer zweiten Gruppe von Gütern die Entgasung verboten (Roherdöl (mit mehr als 10 % Benzen, entzündbarer flüssiger Stoff, a.n.g. mit mehr als 10 % Benzen und Kohlenwasserstoffe, a.n.g. mit mehr als 10% Benzen);
3. Innerhalb von 3 oder 4 Jahren nach der Ratifizierung werden die Dämpfe von einer weiteren Gruppe von Gütern verboten⁴, und zwar abhängig von den Ergebnissen einer Zwischenevaluierung.

Konkret bedeutet dies ein Entgasungsverbot für Rohöl und Mineralölprodukte. Ein Restgehalt zur freien Ventilation ist hierbei jedoch jeweils vorgesehen. Dieser beläuft sich bei den hier relevanten Produkten auf 0,12 bis 0,14 Volumenprozent. Bei atmosphärischem Druck und einer Temperatur von 15 °C bedeutet dies eine zugelassene Restmenge zur freien Ventilation von 1,1 kg/m³ (Benzin) bis 1,5 kg/m³ (Rohöl); den durchgeführten Experten*Expertinnengesprächen folgend kann davon ausgegangen werden, dass diese erlaubte Menge auch regelmäßig frei ventiliert wird.

Für das Entleeren/Ventilieren von Ottokraftstoff gelten weiterhin die Anforderungen der 20. BImSchV.

Der § 5 der 20. BImSchV schreibt vor, dass Restdämpfe solange in den Tanks der Binnentankschiffe zurückgehalten werden müssen, bis diese entweder in einem Tanklager wieder befüllt werden oder die Dämpfe einer Abgasreinigungseinrichtung zugeführt werden können (vgl. Abbildung 2).

⁴ Aceton, Cyclohexan, Ethanol (Ethylalkohol) oder Ethanol, Lösung, (Ethylalkohol, Lösung), wässrige Lösung mit mehr als 70 % Vol-% Alkohol, Ethyl-tert-Butylether, Isooctene, Methanol, Roherdöl (mit weniger als 10 % Benzen), Entzündbarer flüssiger Stoff, N.A.G. mit weniger als 10 % Benzen, Methyl-tert-Butylether, Erwärmter flüssiger Stoff, N.A.G., bei oder über 100 °C und, bei Stoffen mit einem Flammpunkt, unter seinem Flammpunkt (einschließlich geschmolzenes Metall, geschmolzenes Salz usw.), Kohlenwasserstoffe, flüssig, N.A.G. mit weniger als 10 % Benzen, Stoffe mit einem Flammpunkt über 60 °C, die in einem Bereich von 15 K unterhalb des Flammpunkts erwärmt zur Beförderung aufgegeben oder befördert werden, oder Stoffe mit Fp > 60 °C, erwärmt näher 15 K unter dem Fp, Stoffe mit einem Flammpunkt über 60 °C und höchstens 100 °C, die nicht anderen Klassen oder Klasse 9 zuzuordnen sind

2.2.1 Emissionsfaktor

Es konnten zwei Ansätze zur Quantifizierung der Emissionen des Ventilierens/Entgasens identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass sich diese nicht auf eine Reinigung beziehen, sondern auf eine Quantifizierung der Gesamtemissionen in Folge des Ventilierens/Entgasens.

Ansatz nach Bauer et al. (2010)

Bauer et al. (2010) liefern Emissionsfaktoren auf Basis der Konzentration von VOCs nach der Entleerung der Tanks. Demnach beträgt die Restmenge 0,5-1 kg Ottokraftstoffdampf/m³. Bei einer durchschnittlichen Tragfähigkeit von Tankmotorschiffen von 1.780 t, was einem Tankvolumen von ca. 2.250 m³ entspricht, ergeben sich pro Ventilierungsvorgang Emissionen von ca. 1.112-2.250 kg. Unter Berücksichtigung weiterer Zuschläge ergeben sich 1.212-2.350 kg Emissionen pro Ventilierungsvorgang. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von 277 Ventilierungen pro Jahr ergibt sich somit eine Menge von 336 t-650 t Ottokraftstoffe, die jährlich von Binnentankschiffen in die Atmosphäre ventiliert werden (Bauer et al. 2010).

Die Abschätzung der Anzahl der Ventilierungen erfolgt auf Basis verschiedener statistischer Daten und Unternehmensinformationen. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 6 zusammengefasst. Für die Emissionen der Reinigung potenziell relevant ist der untere Teil der schematischen Darstellung, die Emissionen aus den geplanten Werftaufenthalten.

Abbildung 6: Ansatz von Bauer et al. (2010) zur Quantifizierung der Ventilierungen

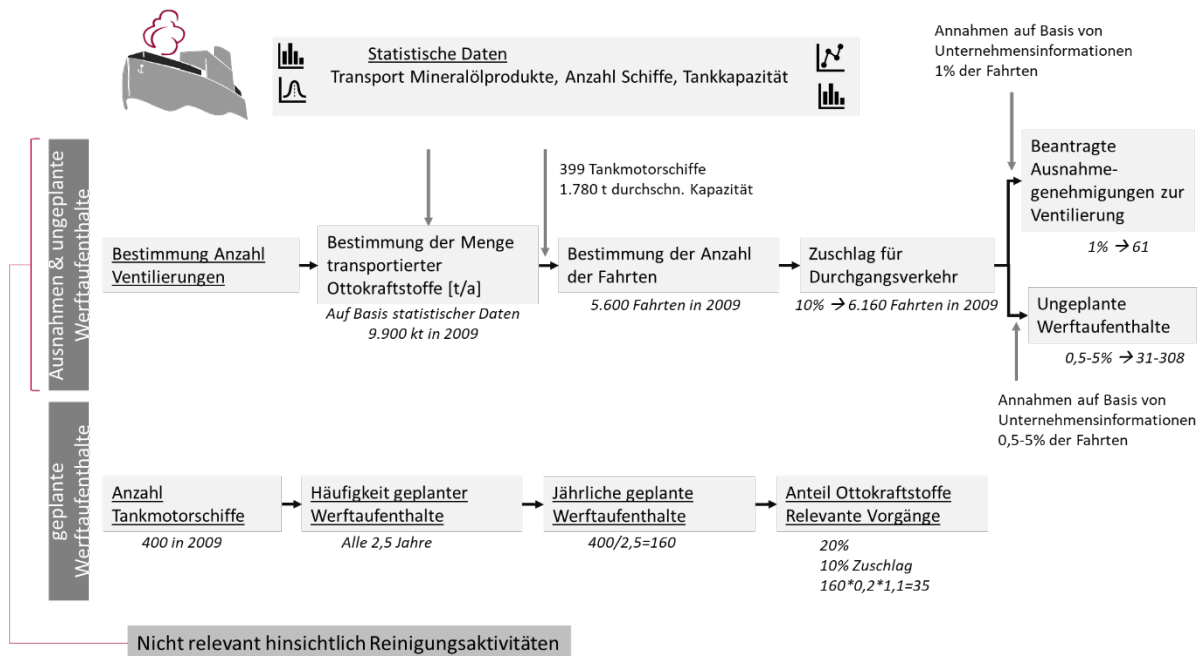


Abbildung: Ökopol auf Basis von Bauer et al. 2010

Dieser Ansatz der Berechnung wird notwendig, da es laut Bauer et al. (2010) keine bundesweite zentrale Erfassung der durchgeführten Ventilierungen von Ottokraftstoffdämpfen auf deutschen Binnengewässern gibt. Zwar werden auf Bundesländer-Ebene die Anzahl der Anträge für eine Genehmigung dokumentiert, eine Zusammenführung der Daten auf Bundesebene findet jedoch nicht statt. Zudem würden nur die Ventilierungen erfasst, für die eine Ausnahmegenehmigung beantragt wurde. Alle Ventilierungen, die aufgrund eines unerwarteten Werftaufenthalts durchgeführt wurden, werden statistisch nicht erfasst, da es keine Meldepflicht gibt. Der Antwort auf eine kleine Anfrage an die Bundesregierung folgend, entsprechen diese Ausführungen weiterhin der vorliegenden Situation (BUND 2019).

Ansatz nach Buck et al. (2013)

Buck et al. (2013) geben für Ottokraftstoff (Gasoline) für das Entgasen einen Emissionsfaktor von 0,93 kg/t an, bezogen auf die Tank-Kapazität. Bezieht man die Angaben von Bauer et al. (2010) auf die gleiche Bezugsgröße der Tank-Kapazität, ergibt sich hier ein Faktor von 0,6 bis 1,3 kg/t. Der Mittelwert dieser Bandbreite stimmt in etwa mit dem Wert nach Buck et al. (2013) überein.

Die Angaben von Buck et al. (2013) sowie von Bauer et al. (2010) beziehen sich dabei wie beschrieben auf das Entgasen, nicht explizit auf das Reinigen. Analog zur Situation bei Raffinerietanks sowie bei Kesselwagen und Straßentankfahrzeugen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Emissionen bei der Reinigung durch das vorab stattfindende Entgasen des Tanks ergeben.

Wenn die Tankentleerung zum Zwecke der Reinigung vorgenommen wird, wären die Emissionen entsprechend der Reinigung zuzuordnen.

2.2.2 Aktivitätsrate

Die heranzuziehende Aktivitätsrate ergibt sich je nach konkret verfolgtem Berechnungsansatz und Emissionsfaktor (siehe Abschnitt 2.2.1; bspw. Bezug auf Anzahl Ventilierungen oder Kapazität). In jedem Fall stellen die Anzahl der aktiven Binnentankschiffe (Tankmotorschiffe) und Transporte die Basis dar.

Daten liegen für die im Projektkontext relevanten Kategorien Erdöl, flüssige Mineralöl-erzeugnisse und gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse vor. In den Daten des Statistischen Bundesamtes wird bei den Transporten der Binnenschifffahrt zwischen Transporten innerhalb Deutschlands, dem grenzüberschreitenden Versand, dem grenzüberschreitenden Empfang und dem Durchgangsverkehr unterschieden.

Transportaktivitäten

Die Güterverkehrsstatistik unterscheidet dabei zwischen Güterumschlag und Güterbeförderung. Der Güterumschlag ergibt sich aus der Summe der wasserseitigen Ein- und Ausladungen von Gütern; hierbei wird die Beförderungsmenge im innerdeutschen Verkehr sowohl bei der versendenden als auch bei der empfangenden Stelle gezählt:

Empfang im innerdeutschen Verkehr
 + Versand im innerdeutschen Verkehr
 + Empfang aus dem Ausland
 + Versand in das Ausland
 = **Güterumschlag**

Bei der Güterbeförderung wird jeder Gütertransport unabhängig von ein- und ausladender Stelle nur einmal gezählt. Hierbei wird auch der Durchgangsverkehr berücksichtigt:

Innerdeutscher Verkehr (Versand=Empfang)
 + Empfang aus dem Ausland
 + Versand in das Ausland
 + Durchgangsverkehr (Transit)
 = **Güterbeförderung**

Mengenmäßig wird das Bild von den flüssigen Mineralölerzeugnissen dominiert. Im Jahr 2022 betrug die Güterbeförderung von flüssigen Mineralölerzeugnissen in Binnentankschiffen bzw.

Tankmotorschiffen in Deutschland rund 27 Mio. t; dazu kommen rund 50.000 t Erdöl und 2,2 Mio. t gasförmige/verflüssigte/verdichtete Mineralölerzeugnisse.

Der Gesamttransport in Binnentankschiffen/Tankmotorschiffen betrug rund 45 Mio. t. Etwa die Hälfte der Güterbeförderung in Tankmotorschiffen ist dementsprechend auf Mineralölerzeugnisse zurückzuführen. Die Relevanz von Erdöl ist dabei auch mit Blick auf die Zeitreihe sehr gering.

Abbildung 7: Transporte von Mineralölerzeugnissen

Jahr	Produkt	Innerdeutscher Verkehr [t]	Grenzüberschreitender Versand [t]	Grenzüberschreitender Empfang [t]	Durchgangsverkehr [t]	Summe = Güterbeförderung [t]
2018	Erdöl	-	2.400	17.171	18.448	38.019
	Flüssige Mineralölerzeugnisse	10.487.015	5.248.439	9.798.182	707.385	26.241.021
	Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerz.	537.661	397.524	1.008.830	681.543	2.625.558
2019	Erdöl	1.910	1.226	44.073	-	47.209
	Flüssige Mineralölerzeugnisse	11.548.574	5.525.916	12.405.595	2.768.145	32.248.230
	Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerz.	637.924	478.778	924.183	-	2.040.885
2020	Erdöl	-	1.097	45.330	-	46.427
	Flüssige Mineralölerzeugnisse	9.917.045	6.342.124	10.747.795	1.949.045	28.956.009
	Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerz.	506.444	549.583	991.987	-	2.048.014
2021	Erdöl	-	3.400	59.797	1.000	64.197
	Flüssige Mineralölerzeugnisse	9.240.884	6.789.677	10.135.709	2.012.311	28.178.581
	Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerz.	497.460	640.303	1.355.376	-	2.493.139
2022	Erdöl	2.967	196	49.488	-	52.651
	Flüssige Mineralölerzeugnisse	9.691.563	7.228.035	8.991.361	1.104.324	27.015.283
	Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerz.	423.331	472.645	1.344.624	-	2.240.600
Zum Vergleich: Güterbeförderung in Tankmotorschiffen, gesamt (alle Güter), 2021						48.580.000,00
Zum Vergleich: Güterbeförderung in Tankmotorschiffen, gesamt (alle Güter), 2022						44.905.000,00

Quelle: Ökopol, zusammengestellt auf Basis von Destatis Tabellen (46321-01; 46321-07)

Wie beschrieben finden Reinigungen potenziell beim Wechsel zwischen nicht kompatiblen Produkten oder bei Produktwechseln zur Qualitätssicherung statt. Eine Reinigung ist also dem Versand (innerdeutsch oder ins Ausland) vorgeschaltet. In Bezug auf die in der Statistik geführten Größen bedeutet dies, dass der Versand im innerdeutschen Verkehr bzw. in das/aus dem Ausland relevant ist, während der Durchgangsverkehr zu vernachlässigen ist:

Innerdeutscher Verkehr (Versand=Empfang)
 + Versand in das Ausland
 = **Versand (als relevante Bezugsgröße für Reinigungsaktivitäten)**

Für den so berechneten Versand ergibt sich folgende Zeitreihe:

Tabelle 6: Zeitreihe des Versands von Erdöl und Mineralölerzeugnissen

Jahr	Menge [1.000 t]
2022	17.819
2021	17.172

Jahr	Menge [1.000 t]
2020	17.316
2019	18.194
2018	16.673
2017	19.420
2016	18.918
2015	18.486
2014	18.130
2013	18.036
2012	16.748
2011	15.763
2010	13.748
2009	14.673
2008	16.948
2007	18.217
2006	17.393
2005	17.535
2004	16.868
2003	15.006
2002	15.477
2001	15.127
2000	14.568
1999	14.842
1998	15.183
1997	15.932
1996	16.826
1995	16.993
1994	19.018
1993	17.315

Quelle: Destatis. Für die Jahre 1990-1992 konnten von Destatis keine entsprechenden Daten verfügbar gemacht werden.

Schiffsbestand

Der Bestand an Tankmotorschiffen unterliegt jährlichen Schwankungen, hat sich aber – nach einem Rückgang von 1990 bis 1999 – in der Tendenz in den letzten Jahren nach oben entwickelt, von 305 Tankmotorschiffen im Jahr 2000 auf 405 Tankmotorschiffe in 2021. Mit Zunahme der

Anzahl der Schiffe hat sich auch die Gesamtkapazität nach oben entwickelt, von 446.000 t in 2000 auf 773.000 t in 2021 (WSV 2014, 2018, 2022).

Die durchschnittliche Kapazität der Tankmotorschiffe ist in diesem Zeitraum von 1.460 t auf rund 1.900 t gestiegen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Entwicklung von Schiffanzahl und Beförderungskapazität

Jahr	Anzahl Tankmotorschiffe	Kapazität [kt]	Durchschnittliche Kapazität (errechnet) [t]
2021	405	773	1.909
2020	408	757	1.855
2019	404	737	1.824
2018	410	736	1.795
2017	375	713	1.901
2016	372	702	1.887
2015	363	691	1.904
2014	362	688	1.901
2013	366	686	1.874
2012	380	698	1.837
2011	402	735	1.828
2010	419	759	1.811
2009*	399	709	1.777
2008	398	684	1.719
2007	389	659	1.694
2006	375	620	1.653
2005	369	604	1.637
2004	344	537	1.561
2003	332	509	1.533
2002	323	482	1.492
2001	313	460	1.470
2000*	305	446	1.462
1999	307	447	1.456
1998	330	472	1.430
1997	342	492	1.439
1996	354	502	1.418
1995	355	496	1.397

Jahr	Anzahl Tankmotorschiffe	Kapazität [kt]	Durchschnittliche Kapazität (errechnet) [t]
1994	383	527	1.376
1993	387	531	1.372
1992	397	546	1.375
1991	400	551	1.378
1990	409	557	1.362

* Bezugsjahre der Betrachtung von Bauer et al. (2010)

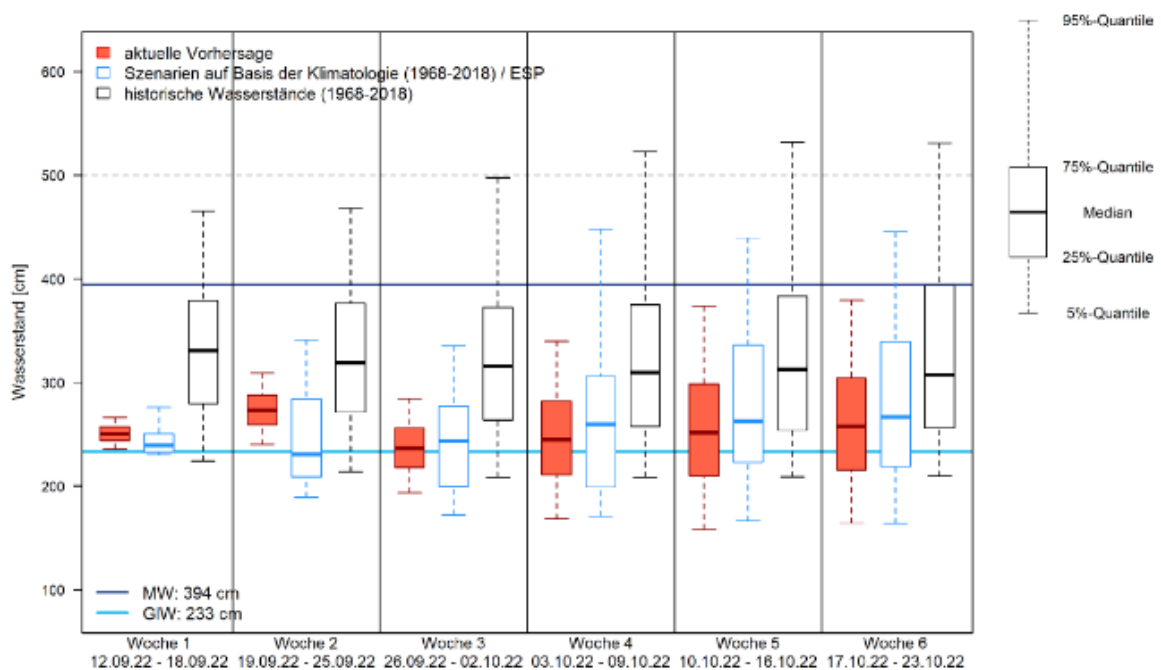
Quelle: Schiffanzahl und Kapazität aus WSV 2014, 2018, 2022

Für die rund 17 Mio. t, die in 2021 via Binnenschiff versendet wurden, ergeben sich unter Annahme der durchschnittlichen Kapazität des Jahres 2021 von 1.909 t (Tabelle 7) und einer vollen Ausnutzung dieser Kapazität für 2021 rund 9.000 „Versendungen“ mit potenziell vorab erfolgter Reinigung. Die entsprechende Zeitreihe ist in Tabelle 8 dargestellt.

Die Betrachtung der Zeitreihe des Versands (Tabelle 6) und der Anzahl der Tankmotorschiffe und der Kapazität (Tabelle 7) zeigt jedoch, dass bei eher konstanter versendeter Menge die Schiffanzahl und die Kapazität tendenziell gestiegen sind. Ein Grund hierfür kann in der eingeschränkten Schiffbarkeit der freifließenden Binnengewässer durch Niedrigwasser liegen.

Der Trend zunehmender Niedrigwassertage ist an quasi allen schiffahrtsrelevanten freifließenden Gewässern festzustellen (BfG 2023, 2022a; BAG 2020). Abbildung 8 illustriert dies anhand eines Beispiels (Rheinpegel in Duisburg); in Abbildung 9 wird für einen beispielhaften Stichtag aufgezeigt, wie sich die Verteilung von Niedrigwasser über die Bundeswasserstraßen darstellt. Für den Transport in Tankmotorschiffen kann dies bedeuten, dass nicht die volle Tankkapazität ausgeschöpft wird (BfG 2023).

Abbildung 8: Beispiel Rhein – Duisburg-Ruhrort. Pegel-Vorhersage



Hydrologische 6-Wochen-Vorhersage der BfG vom 12.09.2022 für den Pegel Duisburg-Ruhrort

Quelle: BfG (2022b)

Abbildung 9: Pegelkarte für Deutschland vom 04.08.2022

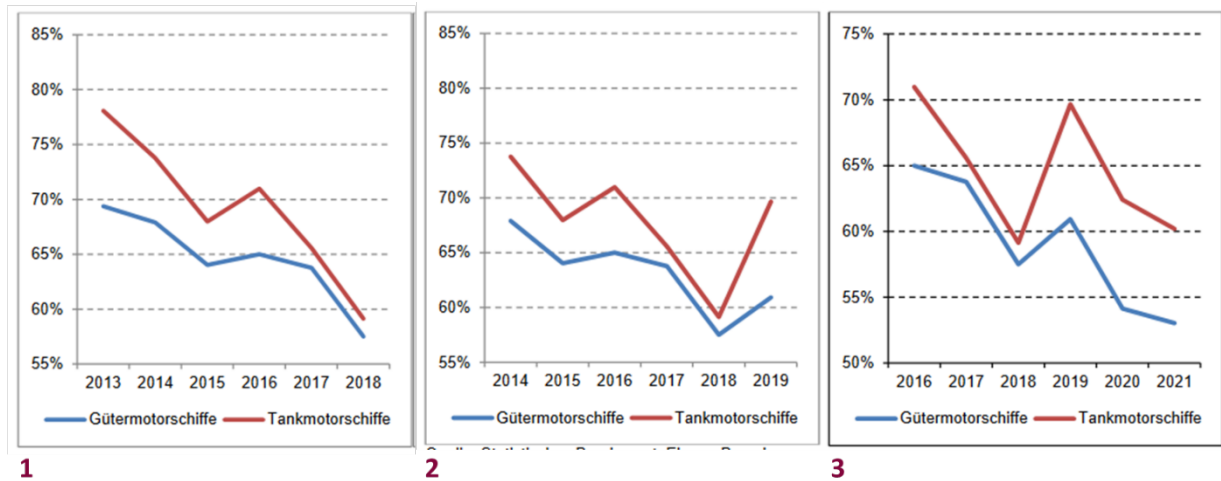


Orange Markierungen zeigen Pegel, die aktuell Niedrigwasserstände kleiner oder gleich dem mittleren jährlichen Niedrigwasserstand (MNW) aufweisen (nur Bundeswasserstraßen)

Quelle: BfG (2022a)

Es liegen vereinzelte Statistiken vor, die Angaben zur Auslastung von Tankmotorschiffen machen. Angaben der BAG (2020) zeigen für Tankmotorschiffe für die Jahre 2013 bis 2018 einen Rückgang der Auslastung von rund 78 % auf 60 %, in 2019 wiederum einen Anstieg auf rund 70 % und schließlich wieder einen Rückgang auf 60 % (vgl. Abbildung 10). Für frühere Jahre werden zur Auslastung in den Berichten der BAG keine Angaben gemacht.

Abbildung 10: Gewichtsmäßige Auslastung ausgewählter Schiffsarten seit 2013 in %



1: 2013-2018; 2: 2014-2019; 3: 2016-2021

Quelle: BAG (2020, 2022, 2019a)

Ohne Berücksichtigung der kapazitätsmäßigen Minderauslastung ergibt sich die in Tabelle 8 dargestellte Zeitreihe der Versendungen.

Tabelle 8: Zeitreihe der Versendungen mit Tankmotorschiffen (ohne Berücksichtigung von Minderauslastungen)

Jahr	Anzahl Versendungen
2021	8.997
2020	9.333
2019	9.973
2018	9.288
2017	10.214
2016	10.025
2015	9.711
2014	9.539
2013	9.623
2012	9.118
2011	8.621
2010	7.589
2009	8.257
2008	9.862
2007	10.753
2006	10.520

Jahr	Anzahl Versendungen
2005	10.713
2004	10.806
2003	9.788
2002	10.372
2001	10.293
2000	9.962
1999	10.193
1998	10.615
1997	11.075
1996	11.865
1995	12.162
1994	13.821
1993	12.619
1992*	-

* Für die Jahre 1990-1992 liegen nicht ausreichend Daten zur Berechnung vor.

Quelle: Berechnet auf Basis von Destatis Daten

Zur Berücksichtigung der Kapazitätsauslastung wird auf die BAG-Angaben zurückgegriffen. Da für die Jahre 1990 bis 2012 keine entsprechenden Daten vorliegen, sind hier Annahmen zu treffen. Da wie zuvor beschrieben die Häufigkeit von Niedrigwassertagen zunimmt und dies zu einem steigenden Anteil von Fahrten mit reduzierter Auslastung führen kann, wird retrospektiv von steigenden Auslastungen ausgegangen. Es werden für das Jahr 1990 drei Varianten, 80 %, 85 % und 90 % gerechnet; die Jahre zwischen 1990 und 2012 werden linear interpoliert.

Die entsprechende Zeitreihe der Kapazitätsauslastung findet sich in folgender Tabelle.

Tabelle 9: Zeitreihe der Kapazitätsauslastung von Tankmotorschiffen

Jahr	Kapazitätsauslastung - MITTEL	Kapazitätsauslastung - MAX	Kapazitätsauslastung - MIN
2021	60%	60%	60%
2020	62%	62%	62%
2019	70%	70%	70%
2018	60%	60%	60%
2017	65%	65%	65%
2016	70%	70%	70%
2015	68%	68%	68%

Jahr	Kapazitätsauslastung - MITTEL	Kapazitätsauslastung - MAX	Kapazitätsauslastung - MIN
2014	74%	74%	74%
2013	78%	78%	78%
2012	78%	79%	78%
2011	79%	79%	78%
2010	79%	80%	78%
2009	79%	80%	78%
2008	80%	81%	78%
2007	80%	81%	79%
2006	80%	82%	79%
2005	80%	82%	79%
2004	81%	83%	79%
2003	81%	83%	79%
2002	81%	84%	79%
2001	82%	84%	79%
2000	82%	85%	79%
1999	82%	85%	79%
1998	83%	86%	79%
1997	83%	86%	79%
1996	83%	87%	79%
1995	83%	87%	80%
1994	84%	88%	80%
1993	84%	88%	80%
1992	84%	89%	80%
1991	85%	89%	80%
1990	85%	90%	80%

Quelle: Ökopol, BAG (2020, 2022, 2019a)

Auf dieser Basis ergibt sich eine differenzierte Zeitreihe für die Versendungen.

Tabelle 10: Zeitreihe der Versendungen mit Tankmotorschiffen (Berücksichtigung von Minderauslastungen)

Jahr	Anzahl Versendungen (theoretisches Maximum)	Anzahl Versendungen (Kapazitätsauslastung "MITTEL")	Anzahl Versendungen (Kapazitätsauslastung "MIN")	Anzahl Versendungen (Kapazitätsauslastung "MAX")
2021	8.997	14.995	14.995	14.995
2020	9.333	15.053	15.053	15.053
2019	9.973	14.248	14.248	14.248
2018	9.288	15.480	15.480	15.480
2017	10.214	15.714	15.714	15.714
2016	10.025	14.321	14.321	14.321
2015	9.711	14.281	14.281	14.281
2014	9.539	12.891	12.891	12.891
2013	9.623	12.337	12.337	12.337
2012	9.118	11.644	11.676	11.612
2011	8.621	10.967	11.028	10.907
2010	7.589	9.618	9.698	9.539
2009	8.257	10.424	10.539	10.311
2008	9.862	12.401	12.573	12.234
2007	10.753	13.471	13.695	13.254
2006	10.520	13.129	13.383	12.884
2005	10.713	13.318	13.613	13.037
2004	10.806	13.383	13.716	13.067
2003	9.788	12.077	12.410	11.762
2002	10.372	12.750	13.136	12.386
2001	10.293	12.606	13.022	12.216
2000	9.962	12.156	12.590	11.751
1999	10.193	12.392	12.868	11.950
1998	10.615	12.857	13.385	12.368
1997	11.075	13.364	13.949	12.826
1996	11.865	14.266	14.929	13.659
1995	12.162	14.569	15.286	13.917
1994	13.821	16.497	17.352	15.722
1993	12.619	15.008	15.826	14.270

Quelle: Ökopol, berechnet

Wie beschrieben sind die tatsächlichen Fälle, in denen zwischen nicht kompatiblen Produkten gewechselt wird bzw. Fälle, in denen eine Reinigung zur Qualitätssicherung verlangt wird, sehr selten. Basierend auf den geführten Gesprächen wird abgeschätzt, dass in 1-3 % der Fälle (Fahrten) eine Reinigung vorgenommen wird. Auf dieser Basis sowie unter Berücksichtigung der drei Szenarien zur Kapazitätsauslastung wird die Zeitreihe der Anzahl der Reinigungen berechnet. Die resultierende Zeitreihe ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 11: Zeitreihe - Reinigungen von Tankmotorschiffen wegen Produktwechsel

Jahr	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MIN	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MAX	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MITTEL
2021	150	450	300
2020	151	452	301
2019	142	427	285
2018	155	464	310
2017	157	471	314
2016	143	430	286
2015	143	428	286
2014	129	387	258
2013	123	370	247
2012	117	348	233
2011	110	327	219
2010	97	286	192
2009	105	309	208
2008	126	367	248
2007	137	398	269
2006	134	387	263
2005	136	391	266
2004	137	392	268
2003	124	353	242
2002	131	372	255
2001	130	366	252
2000	126	353	243
1999	129	358	248
1998	134	371	257
1997	139	385	267
1996	149	410	285

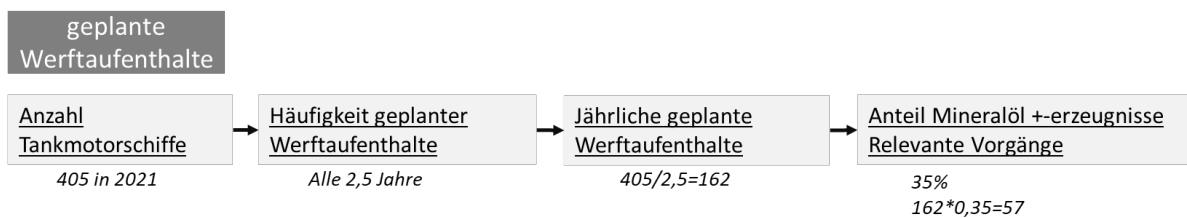
Jahr	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MIN	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MAX	Anzahl Reinigungen wegen Produktwechsel – MITTEL
1995	153	418	291
1994	174	472	330
1993	158	428	300

Quelle: Ökopol. Berechnet auf Grundlage von Destatis Daten. Für die Jahre 1990-1992 lagen nicht ausreichend Daten vor.

Zusätzlich zur Reinigung vor dem Versand (Neubefüllung) kann im Rahmen von geplanten Werftaufenthalten zur Prüfung der Tanks eine Reinigung notwendig sein. Einer entsprechenden Rückmeldung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes folgend, kann dies als die Regel angesehen werden.

Die Anzahl der geplanten Werftaufenthalte lässt sich analog zu Bauer et al. (2010) unter Nutzung aktueller statistischer Daten errechnen.

Abbildung 11: Berechnung geplanter Werftaufenthalte von Tankmotorschiffen in 2021



Die entsprechende Zeitreihe findet sich in folgender Tabelle. Die Anzahl relevanter Vorgänge ist über den Anteil der jeweiligen Produkte am Gesamttransport mit Tankmotorschiffen berechnet.

Tabelle 12: Zeitreihe relevanter Werftaufenthalte von Tankmotorschiffen

Jahr	Jährliche geplante Werftaufenthalte	Anteil relevante Vorgänge	Anzahl relevanter Vorgänge
2021	162	35%	57
2020	163	36%	58
2019	162	38%	61
2018	164	36%	59
2017	150	38%	57
2016	149	38%	57
2015	145	38%	56
2014	145	37%	54
2013	146	37%	54
2012	152	35%	53
2011	161	35%	57
2010	168	28%	46

Jahr	Jährliche geplante Werftaufenthalte	Anteil relevante Vorgänge	Anzahl relevanter Vorgänge
2009	160	31%	50
2008	159	36%	57
2007	156	39%	60
2006	150	36%	54
2005	148	38%	56
2004	138	37%	51
2003	133	35%	47
2002	129	34%	44
2001	125	32%	41
2000	122	31%	38
1999	123	34%	41
1998	132	33%	43
1997	137	33%	45
1996	142	35%	50
1995	142	36%	51
1994	153	40%	61
1993	155	38%	58
1992	159	38%	60
1991	160	38%	60
1990	164	38%	62

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Destatis Daten (46321-0007), Fachserie 8 Reihe 4, sowie (WSV 2022; BAG 2019b)

2.3 Eisenbahnkesselwagen

Eisenbahnkesselwagen werden für den Transport verschiedener Mineralölprodukte eingesetzt, schwerpunktmäßig für Ottokraftstoffe, Dieselmotoren, Heizöl (leicht, schwer) und Rohbenzin (Joas et al. 2004).

Die Innenraumreinigung von Eisenbahnkesselwagen wird i.d.R. in Kombination mit Reparaturarbeiten, vor Kesselprüfungen (alle 8 Jahre), bei einem Produktwechsel oder einem Wechsel des Mieters durchgeführt. Die Reinigungsanforderungen (Sicherheitsmaßnahmen und Reinigungsverfahren) stehen in engem Zusammenhang mit der Art des Füllguts (Produkteigenschaften) (Joas et al. 2004; Experten*Expertinnengespräche mit cotac group, DB Cargo, Verband Tankwageninnenreinigung).

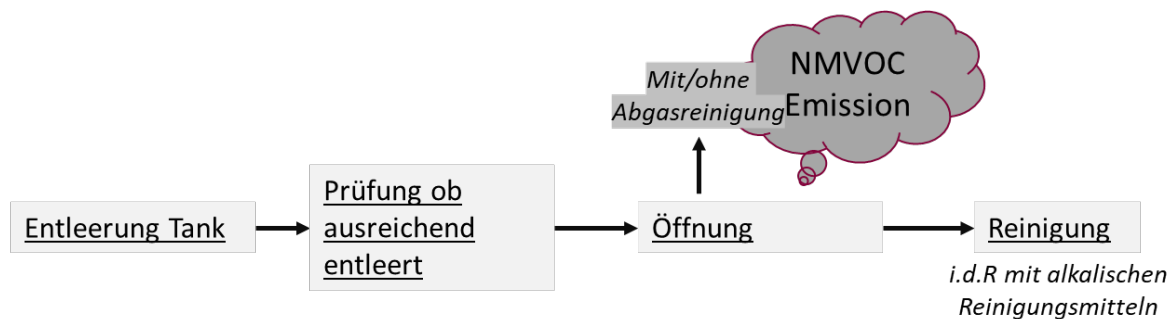
Nach dem Öffnen des Mannlochs wird ein Reinigungskopf am Domdeckel befestigt und die Waschvorgänge werden unter hohem Druck (bis zu 200 bar) durchgeführt. Je nach Reinigungsprogramm werden in den meisten Fällen alkalische Reinigungsmittel verwendet.

Lösemittelhaltige Reinigungsmittel finden hierbei i.d.R. keine Anwendung (Experten*Expertinnengespräche).

Wenn sich nach dem Waschen noch zu feste Schlamm- („Gatsch“) Anhaftungen im Tank befinden, kann eine manuelle Reinigung erfolgen. Dabei steigt das Reinigungspersonal durch das Mannloch in den Tank. Zum Abschluss des Reinigungsprozesses muss der Tank einen bestimmten Mindestreinheitsgrad aufweisen. Der erforderliche zu erreichende Reinigungsgrad wird anhand von Zahlencodes durch den UIP (Union Internationale de la Propriété Immobilière)-Reinheitsschlüssel definiert (Joas et al. 2004; Experten*Expertinnengespräche).

Der schematisierte Ablauf ist in folgender Abbildung dargestellt.

Abbildung 12: Schematische Darstellung des Ablaufs der Reinigung von Kesselwagen



Quelle: Ökopoll

2.3.1 Emissionsfaktor

Die Emissionen bei der Reinigung ergeben sich durch die flüchtigen Produktreste im Tank. Während des Reinigungsprozesses wird der gesamte Inhalt der Tankatmosphäre ausgetauscht (Joas et al. 2004). Eventuell vorhandene flüssige Restmengen werden vollständig über das Washwasser ausgetragen. Ein Teil der Abluft wird ohne Abluftbehandlung in die Atmosphäre emittiert. Der Rest der Abluft wird ggf. durch die Abluftreinigung behandelt, die eine Emissionsreduktion um 99,5 % erreichen kann. Die restlichen 0,5 % (5 g/m³) gelangen weiterhin in die Atmosphäre.

Informationen aus den geführten Experten*Expertinnengesprächen folgend, findet eine Abluftbehandlung in etwa 50 % der Fälle statt. Bezüglich des Anteils für frühere Jahre wurde lediglich auf eine steigende Verbreitung von Abluftbehandlung verwiesen.

Eine Quantifizierung der Emissionen pro Kesselwagenreinigung findet sich bei Joas et al. (2004). Demnach entweichen beim Öffnen des Mannlochs des Tanks schätzungsweise 14,6 m³ (16 %) des Tankinhalts. Nach Weyer (1998) enthält ein Kubikmeter eines entleerten Tanks 1 kg VOC-Emissionen bei einer Temperatur von 20 °C. Demnach ergeben sich pro Reinigungsvorgang Emissionen in Höhe von rund 15 kg.

Tabelle 13: VOC-Emissionen pro gereinigtem Kesselwagen

Emissionsquelle	VOC-Emissionen [kg]
Ungeminderte VOC-Emissionen beim Öffnen des Mannlochs	14,6
Emissionen nach Abluftreinigung	0,377

Quelle: Joas et al. (2004)

Emissionsfaktoren US EPA

Von der US EPA (1995) gibt es veröffentlichte Emissionsfaktoren für „repräsentative organische Chemikalien“, die in Kesselwagen und Tanklastwagen befördert werden.

Die für Kesselwagen relevanten Faktoren finden sich in folgender Tabelle:

Tabelle 14: Emissionsfaktoren der US-EPA für Kesselwagenreinigung

Stoff	Emissionen pro gereinigtem Wagen [g/Wagen]
Ethylene glycol	0,3
Chlorobenzene	15,7
o-Dichlorobenzene	75,4
Creosote	2.350

Quelle: US EPA (1995)

Speziell für beispielsweise Ottokraftstoffe oder andere hier relevante Mineralölerzeugnisse werden keine Angaben zu Emissionsfaktoren gemacht, so dass eine Anwendung für den Zweck dieser Studie nicht möglich ist.

2.3.2 Aktivitätsrate

Joas et al. (2004) führen aus, dass Deutschland einen Bestand von insgesamt 5.500 Ottokraftstoffkesselwagen mit einem mittleren Fassungsvermögen von 90 m³ hat. Es wird davon ausgegangen, dass Kesselwagen alle zwei Jahre gereinigt werden, so dass pro Jahr etwa 2.500 Kesselwagenreinigungsvorgänge durchgeführt werden. Bei einer Gesamtlebensdauer von 30 bis 40 Jahren durchläuft ein Kesselwagen somit 15 bis 20 Reinigungsprozesse.

Die aktuell durchgeführten Experten*Expertinnengespräche (DB Cargo, Cotac Group, Verband der Tankwageninnenreinigung) haben folgende Erkenntnisse ergeben:

- ▶ Eine belastbare Statistik zum Bestand an Kesselwagen in Deutschland ist nicht verfügbar.
- ▶ Es gibt Bestandsaufnahmen und Abschätzungen der Branche, die sich auf den Bestand in der EU beziehen (EU-Netz soweit Normal-Spur, d.h. ohne iberische Halbinsel, Irland, Finnland, Baltikum). Hier wird für das Jahr 2021 von 41.000 Kesselwagen ausgegangen, davon für helle Mineralöle (Dieselkraftstoff/Ottokraftstoff) 25.000-27.000. Die Aufteilung zwischen Ottokraftstoff und Dieselkraftstoff beträgt dabei etwa 1/3 zu 2/3.
- ▶ Die Größe der Kesselwagen hat sich kontinuierlich nach oben entwickelt. Neue Kesselwagen hätten heute ein durchschnittliches Fassungsvermögen von etwa 98 m³. Im Schnitt ist schätzungsweise von einem Volumen von 94 m³ auszugehen.
- ▶ Eine Reinigung findet alle 3 bis 8 Jahre statt, wobei der Schnitt eher am unteren Ende dieser Spanne mit 3 bis 4 Jahre zu verorten ist.
- ▶ Die Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Kesselwagens beträgt 30 bis 40 Jahre.

Der Anteil Deutschlands an den Ablieferungen von Mineralölerzeugnissen in der EU (ohne Iberische Halbinsel, Irland, Finnland, Baltikum) beträgt etwa 25-30 % (berechnet auf Basis Eurostat (2002, 1999)). Auf dieser Basis lässt sich anhand der Erkenntnisse aus der Experten*Expertinnenbefragung eine relevante Menge zu berücksichtigender Kesselwagen für das Jahr 2021 von 6.250-8.100 berechnen. Nimmt man für das Jahr 2003 die Zahl von 5.500 von

Joas et al. (2004), können die Jahre dazwischen und davor durch lineare Interpolation angenähert werden. Bezüglich der durchschnittlichen Kapazität der Kesselwagen wird analog verfahren.

Auf Basis der erhobenen Angaben zum Reinigungsintervall und der errechneten Zeitreihe zum Bestand an Kesselwagen lässt sich die Spanne der jährlichen Reinigungsvorgänge ermitteln. Für diese Berechnung wird für das Jahr 2021 ein durchschnittliches Reinigungsintervall von 3,5 Jahren angenommen. Für das Jahr 2003 wird auf Basis der Daten aus (Joas et al. 2004) ein Intervall von 2,2 Jahren angesetzt. Für die Jahre vor 2003 wird das gleiche Intervall wie in 2003 angenommen.

Tabelle 15: Zeitreihe Anzahl Kesselwagen, Kapazität und jährliche Reinigungsvorgänge

Jahr	Anzahl Kesselwagen MIN	Anzahl Kesselwagen MAX	Durchschn. Kapazität [m ³]	Reinigungsvorgänge MIN	Reinigungsvorgänge MAX
2021	6.250	8.100	94,0	1.786	2.314
2020	6.208	7.956	93,8	1.811	2.321
2019	6.167	7.811	93,6	1.838	2.328
2018	6.125	7.667	93,3	1.865	2.335
2017	6.083	7.522	93,1	1.894	2.343
2016	6.042	7.378	92,9	1.925	2.350
2015	6.000	7.233	92,7	1.957	2.359
2014	5.958	7.089	92,4	1.990	2.367
2013	5.917	6.944	92,2	2.025	2.376
2012	5.875	6.800	92,0	2.061	2.386
2011	5.833	6.656	91,8	2.100	2.396
2010	5.792	6.511	91,6	2.141	2.407
2009	5.750	6.367	91,3	2.184	2.418
2008	5.708	6.222	91,1	2.229	2.430
2007	5.667	6.078	90,9	2.277	2.442
2006	5.625	5.933	90,7	2.328	2.455
2005	5.583	5.789	90,4	2.382	2.469
2004	5.542	5.644	90,2	2.439	2.484
2003	5.500	5.500	90,0	2.500	2.500
2002	5.458	5.356	89,8	2.434	2.481
2001	5.417	5.211	89,6	2.369	2.462
2000	5.375	5.067	89,3	2.303	2.443
1999	5.333	4.922	89,1	2.237	2.424

Jahr	Anzahl Kesselwagen MIN	Anzahl Kesselwagen MAX	Durchschn. Kapazität [m ³]	Reinigungsvorgänge MIN	Reinigungsvorgänge MAX
1998	5.292	4.778	88,9	2.172	2.405
1997	5.250	4.633	88,7	2.106	2.386
1996	5.208	4.489	88,4	2.040	2.367
1995	5.167	4.344	88,2	1.975	2.348
1994	5.125	4.200	88,0	1.909	2.330
1993	5.083	4.056	87,8	1.843	2.311
1992	5.042	3.911	87,6	1.778	2.292
1991	5.000	3.767	87,3	1.712	2.273
1990	4.958	3.622	87,1	1.646	2.254

Quelle: Eigene Berechnungen

2.4 Tankwagen

Für den Straßentransport von Mineralöl und Mineralölprodukten werden Tankwagen genutzt. Transportierte Produkte sind primär Ottokraftstoffe, Dieselkraftstoff und Heizöl. Von geringerer Relevanz ist der Transport von Flüssiggas, Flugturbinenkraftstoff, Schmierstoffen und chemischen Produkten.

Auch beim Transport via Tankwagen findet eine Reinigung i.d.R. dann statt, wenn ein Wechsel zwischen nicht kompatiblen Produkten vorgesehen ist (bspw. von Ottokraftstoffen auf leichtes Heizöl; vgl. nachfolgende Textbox) und/oder zur Qualitätssicherung. Laut Literatur- und Stakeholderinformationen (WR, HuR, EFTCO; Berufsgenossenschaft) kann dies bei Tankwagen relativ häufig der Fall sein; geschätzt wurde eine Intensität von bis zu einmal wöchentlich⁵.

Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten: Füllstellen, Entleerstellen und Flugfeldbetankungsstellen (BArbBI 2002)

Abschnitt 6.5

(1) Sollen an einer Füllstelle Tanks von Tankfahrzeugen, Aufsetztanks, Tanks von Eisenbahnkesselwagen und Tankcontainer wechselweise mit einer brennbaren Flüssigkeit niedrigerer Gefährklasse als dem ihrer vorherigen Füllung befüllt werden, muss sichergestellt sein, dass gefährliche Flammpunktunterschreitungen durch Vermischungen nicht auftreten.

(2) Absatz 1 kann z. B. erfüllt werden, wenn die Transportbehälter und die zugehörigen Leitungen und Armaturen vor dem Füllgutwechsel vollständig entleert werden. Erforderlichenfalls muss gespült werden.

Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der Akteursstruktur. Logistikdienstleister transportieren häufig Produkte unterschiedlicher Anbieter; eine Gewährleistung erfolgt hierbei nur bei

⁵ Für die USA gibt die US EPA an, dass Tankwagen, die nicht ausschließlich zum Transport eines bestimmten Produktes verwendet werden, nach jeder Fahrt gereinigt werden. (US EPA, AP-42, Vol. I, CH 4.8).

gereinigten Tanks (So verlangen einige Akteure von den Logistikern ein aktuelles Reinigungszertifikat; beispielsweise fordert HuR ein Reinigungszertifikat nicht älter als 7 Tage).

Die Reinigung erfolgt in speziellen Reinigungsanlagen. Vor der Reinigung müssen die Tankwagen entleert sein und die verbliebene Restmenge muss sich auf weniger als 20 Liter belaufen. Der Füllstoff des Tankwagens wird bei Anmeldung in der Reinigungsanlage mit Hilfe einer Datenbank überprüft. Reinigungsbetriebe sind nur dazu berechtigt, Tankwagen mit Füllstoffen zu reinigen, für die sie zertifiziert sind.

Die Datenbank prüft dies für jeden Tankwagen, der sich anmeldet und generiert das erforderliche Reinigungsverfahren. Der Fahrer positioniert den Tankwagen an der vorgesehenen Reinigungsstelle und öffnet den Tankwagen. Die dann beginnende Reinigung kann nach zwei Verfahren erfolgen, unter Druck oder mit geöffnetem Deckel.

Bei der Reinigung unter Druck handelt es sich um ein geschlossenes Verfahren, bei dem der Inhalt mit Hilfe eines Schlauchs und einer Abluftanlage, die am Tank angebracht sind, unter Druck abgesaugt wird. Bei der Reinigung mit geöffnetem Deckel wird der Tank geöffnet und kaltes, warmes oder heißes Wasser eingespritzt. Je nach Füllstoff und Verschmutzungsgrad können auch Reinigungsmittel (alkalische Reiniger) zum Einsatz kommen.

2.4.1 Emissionsfaktor

Ermittlung auf Basis Stakeholderbefragung und Berechnungen

Basierend auf den durchgeführten Recherchen können die Emissionen, die sich bei der Reinigung durch ungehindertes Entweichen des Tankinhalts beim Öffnen ergeben, auf rund 3,5 bis 3,8 kg geschätzt werden (Berechnung im Zusammenhang mit Experten*Expertinnenbefragung W.T.R.).

Für die Reinigung unter Druck lassen sich die Emissionen auf rund 0,1 kg beziffern.

Laut Auskunft in der Befragung von Reinigungsbetrieben ist die Reinigung unter Druck für Ottokraftstoffe nicht die Regel. Bzgl. des Anteils der Reinigung unter Druck konnten nur grobe Schätzungen gemacht werden, die den Anteil bei Mineralöl und Mineralölerzeugnissen auf 10-30 % beziffern.

Emissionsfaktoren US EPA

Von der US EPA gibt es veröffentlichte Emissionsfaktoren für „repräsentative organische Chemikalien“, die in Tanklastwagen befördert werden.

Die Faktoren finden sich in folgender Tabelle:

Tabelle 16: Emissionsfaktoren für Tankwageninnenreinigung der US-EPA

Stoff	Emissionen pro gereinigtes Fahrzeug [g]
Acetone	311
Perchloroethylene	215
Methyl methacrylate	32,4
Phenol	5,5
Propylene glycol	1,07

Quelle: US EPA 1995

Speziell für beispielsweise Ottokraftstoffe oder andere hier relevante Mineralölerzeugnisse werden keine Angaben zu Emissionsfaktoren gemacht.

2.4.2 Aktivitätsrate

Der Standard-Tankwagen hat wie Eingangs beschrieben ein durchschnittliches Volumen von 24 m³ und wird im Durchschnitt einmal pro Woche (alle sieben Tage) gereinigt.

Relevant für die Aktivitätsrate ist vor diesem Hintergrund die Anzahl der Tankwagen im Bestand; dies umfasst Tankkraftwagen sowie Tankwagen als Kraftfahrzeuganhänger. Grundlage sind Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes. Bis zum Jahr 2011 liegen entsprechende Statistiken zu Tankkraftwagen (für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten) sowie Kraftfahrzeuganhängern (Tankwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten) vor. Aufgrund der EU-Richtlinie 2007/46⁶ und Verordnung 678/2011⁷ ist es ab 2012 zu Änderungen in der statistischen Systematik gekommen. Ab 2012 findet sich in der Statistik keine Unterscheidung zwischen „brennbaren und entzündbaren Flüssigkeiten“ und „sonstigen“ Tankwagen mehr, sondern es wird zwischen Normalgut und Gefahrgut unterschieden. In der Zeitreihe führt dies zu Brüchen bzw. Inkonsistenzen; eine Gleichsetzung der Zahlen für „brennbare und entzündbare Flüssigkeiten“ (bis 2011) und „Gefahrgut“ (ab 2012) ist nicht möglich. Insbesondere bei der Anzahl der Tankanhänger zeigt die Zeitreihe einen Sprung um rund einen Faktor 2.

Um mit dieser statistischen Änderung umzugehen, wird über die Zeitreihe des Anteils der Tankwagen/Tankfahrzeuge für „brennbare und entzündbare Flüssigkeiten“ an allen Tankwagen/Tankfahrzeuge bis 2011 vorgegangen und über die Gesamtzahl der Tankwagen/Tankfahrzeuge ab 2012 die Zeitreihe entsprechend fortgesetzt. Die entsprechende Zeitreihe findet sich in folgender Tabelle.

Tabelle 17: Zeitreihe - Bestand an Tankkraftfahrzeugen und Tankwagen

Jahr	Kraftfahrzeuganhänger, Tankwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Lastkraftwagen, Tankkraftwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Lastkraftwagen, Tankfahrzeuge für Gefahrgut [Anzahl]	Kraftfahrzeuganhänger, Tankanhänger für Gefahrgut [Anzahl]
2022	-	-	7.126	13.869
2021	-	-	7.204	13.973
2020	6.325	6.213	7.042	13.961
2019	6.161	6.171	6.967	13.659
2018	6.041	6.157	6.948	13.480
2017	6.001	6.142	6.915	13.389
2016	6.010	6.183	6.933	13.396
2015	6.045	6.259	7.018	13.511

⁶ RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge

⁷ VERORDNUNG (EU) Nr. 678/2011 DER KOMMISSION vom 14. Juli 2011 zur Ersetzung des Anhangs II und zur Änderung der Anhänge IV, IX und XI der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie)

Jahr	Kraftfahrzeuganhänger, Tankwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Lastkraftwagen, Tankkraftwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Lastkraftwagen, Tankfahrzeuge für Gefahrgut [Anzahl]	Kraftfahrzeuganhänger, Tankanhänger für Gefahrgut [Anzahl]
2014	6.068	6.350	7.146	13.641
2013	6.117	6.373	7.192	13.959
2012	6.127	6.449	7.302	14.107
2011	6.051	6.571	*	*
2010	6.205	6.912	*	*
2009	6.456	7.385	*	*
2008	6.523	7.412	*	*
2007	7.176	8.573	*	*
2006	7.331	8.660	*	*
2005	7.513	8.994	*	*
2004	7.689	9.237	*	*
2003	7.913	9.438	*	*
2002	8.140	9.741	*	*
2001	8.440	9.997	*	*
2000	8.486	9.948	*	*
1999	8.739	10.295	*	*
1998	8.794	10.548	*	*
1997	8.941	10.582	*	*
1996	9.064	10.718	*	*
1995	9.245	11.118	*	*
1994	9.590	11.399	*	*
1993	9.683	11.110	*	*
1992	8.923	10.393	*	*
1991	7.438	9.534	*	*
1990	7.680	10.041	*	*

Errechnet auf Basis von Zahlen des Kraftfahrtbundesamtes (FZ25)

* Statistische Daten liegen vom KBA für die in Spalte 2 und 3 genannten Kategorien bis 2011 vor, danach werden die in Spalte 4 und 5 genannten Kategorien unterschieden. Die Werte in Spalte 2 und 3 ab 2012 sind wie im Text beschrieben errechnet.

Als Grundlage für die Berechnung der Emissionen ist auf Basis dieser Zeitreihe des Bestands an Tankkraftfahrzeugen/Tankwagen die Zeitreihe der Reinigungsvorgänge zu ermitteln. Hierfür ist

die Reinigungshäufigkeit relevant. Wie oben beschrieben kann hier von im Durchschnitt einem Reinigungsvorgang pro Woche ausgegangen werden.

Tabelle 18: Zeitreihe - Reinigungsvorgänge von Tankwagen

Jahr	Reinigungsvorgänge Tankwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Reinigungsvorgänge Tankkraftwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Gesamtanzahl
2020	328.900	323.076	651.976
2019	320.372	320.892	641.264
2018	314.132	320.164	634.296
2017	312.052	319.384	631.436
2016	312.520	321.516	634.036
2015	314.340	325.468	639.808
2014	315.536	330.200	645.736
2013	318.084	331.396	649.480
2012	318.604	335.348	653.952
2011	314.652	341.692	656.344
2010	322.660	359.424	682.084
2009	335.712	384.020	719.732
2008	339.196	385.424	724.620
2007	373.152	445.796	818.948
2006	381.212	450.320	831.532
2005	390.676	467.688	858.364
2004	399.828	480.324	880.152
2003	411.476	490.776	902.252
2002	423.280	506.532	929.812
2001	438.880	519.844	958.724
2000	441.272	517.296	958.568
1999	454.428	535.340	989.768
1998	457.288	548.496	1.005.784
1997	464.932	550.264	1.015.196
1996	471.328	557.336	1.028.664
1995	480.740	578.136	1.058.876
1994	498.680	592.748	1.091.428
1993	503.516	577.720	1.081.236

Jahr	Reinigungsvorgänge Tankwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Reinigungsvorgänge Tankkraftwagen für brennbare und entzündbare Flüssigkeiten [Anzahl]	Gesamtanzahl
1992	463.996	540.436	1.004.432
1991	386.776	495.768	882.544
1990	399.360	522.132	921.492

Quelle: Eigene Berechnungen

2.5 Pipelines

2.5.1 Emissionsfaktor

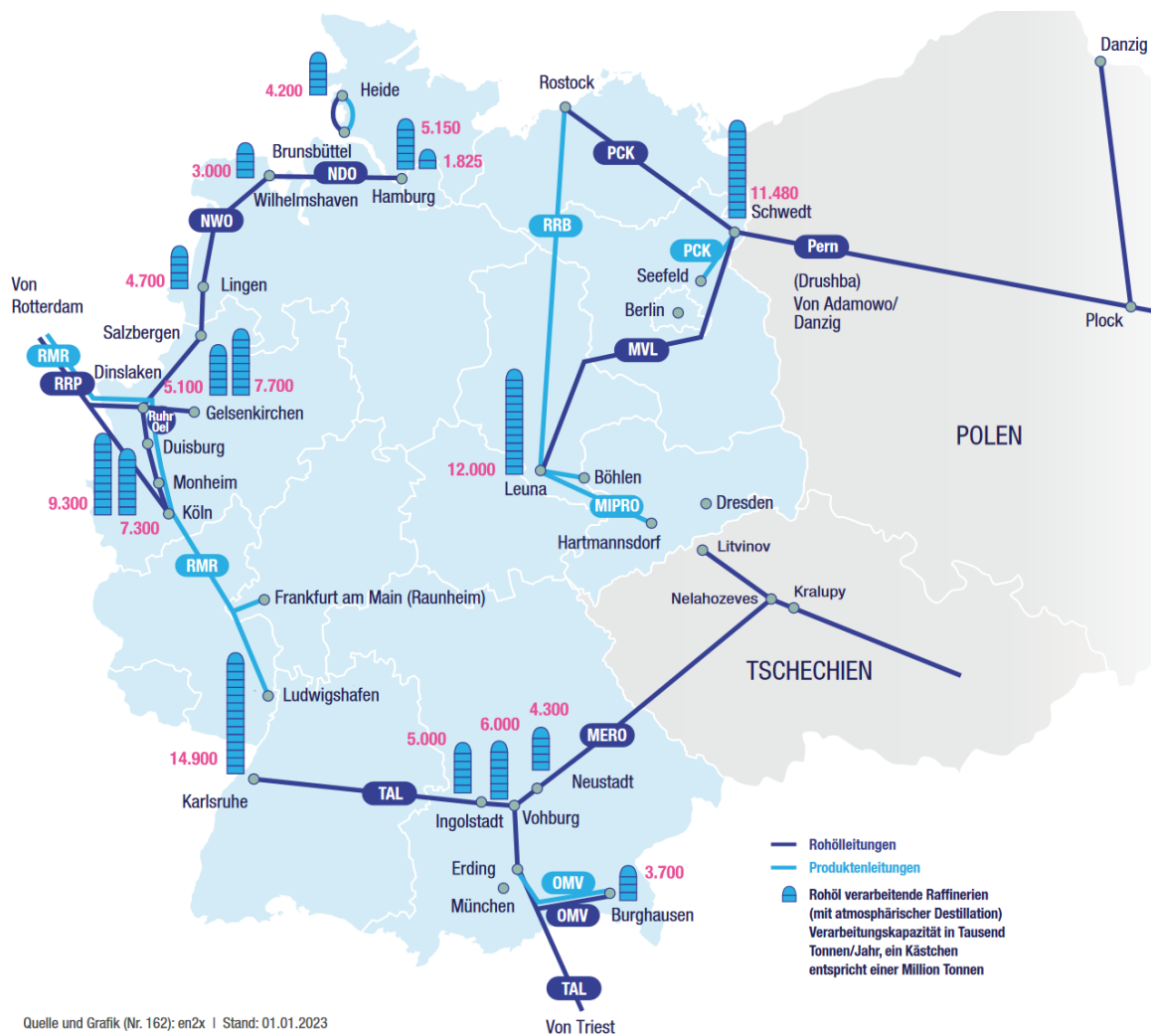
Für Pipelines ergaben die Gespräche mit Betreibern, dass die Reinigung der Leitungen zum einen im laufenden Betrieb durch die Verwendung von „Molchen“ erfolgt, die mit dem Produkt durch die Leitungen gedrückt werden. Zum anderen erfolgt die Reinigung bei Wartungs- und Reparaturarbeiten zur vollständigen Entleerung der Rohrstücke ebenfalls durch die Verwendung von Molchen, die mit Stickstoff durch die Leitung gedrückt werden. Die Molche werden in einer Schleuse entnommen und gewaschen. Der Stickstoff wird in einem Zyklon entspannt und die Abgase über einen Abscheider geführt, damit Öltröpfchen darin abgeschieden werden. Daten zu VOC-Emissionen liegen nicht vor.

VOC-Emissionen werden als vernachlässigbar eingeschätzt, da die Molche nur eine geringe Größe von etwas mehr als dem Rohrdurchmesser aufweisen und bei Rohrentleerung eine Gasableitung über Abscheider erfolgt.

2.5.2 Aktivitätsrate

Die folgende Abbildung zeigt die Rohöl- und Produkt-Pipelines in Deutschland sowie die jeweiligen Betreiber.

Abbildung 13: Pipelines und Betreiber in Deutschland



Quelle: en2x (2023)

Wenn ein Emissionsfaktor für die Reinigung einer definierten Pipelinelänge vorliegt, kann als Aktivitätsrate die Gesamtlänge der Pipelines angesetzt werden. Das Rohölnetz in Deutschland hat eine Länge von 2.400 km (scinexx 2009).

3 Ableitung von Emissions-Zeitreihen

Auf Basis der im Kapitel 2 dokumentierten Erkenntnisse erfolgt im nächsten Schritt des Projektes eine Ableitung differenzierter Zeitreihen der VOC-Emissionen aus der Tankreinigung für die betrachteten Teilbereiche zwischen 1990 und 2021.

Neben den Zeitreihen der Emissionen werden dabei jeweils Angaben zur Aufteilung auf die relevanten Berichtskategorien gemacht:

- ▶ 1.B.2.a.iv „Öl, Verarbeitung und Lagerung“,
- ▶ 1.B.2.a.v „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ sowie
- ▶ 2.B.10 „Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“.

3.1 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager

Auf Basis der vorstehenden Darstellungen zu Emissionsfaktoren aus der Tank-Reinigung und den Daten zur Aktivitätsraten lassen sich Emissionen aus der Reinigung von Raffinerietanklagern und raffineriefern Tanklagern errechnen. Ergänzend sind die Entwicklungen bzgl. der Verbreitung von Fackelanlagen und zu Schwimmdächern zu berücksichtigen.

Zwei Vorgehensweisen sind möglich:

1. Berechnung anhand des DGMK-Emissionsfaktors bezogen auf die Tankbodenfläche.
2. Berechnung anhand des abgeleiteten Emissionsfaktors bezogen auf die Tankkapazität.

Für den ersten Ansatz sind die Zahlen der jährlich gereinigten Tanks aus Tabelle 4 mit der durchschnittlichen Tankbodenfläche (Tabelle 2) und dem Emissionsfaktor von 0,5 kg VOC je m² Tankbodenfläche zu multiplizieren⁸.

Die so ermittelten theoretischen Gesamtemissionen werden durch den Anschluss von Nachverbrennungsanlagen (mobile Fackeln) auf 0,5 % verringert. Dabei ist die tatsächliche Praxis zu berücksichtigen, die gemäß der Experten*Expertinneninterviews – Stand heute bzw. 2012-2021 – in etwa der Hälfte der Reinigungsfälle ohne Fackelanschluss erfolgt.

Den Ausführungen von Mueller-Heuser et al. (2000) und den geführten Experten*Expertinnengesprächen folgend, ist davon auszugehen, dass in der Vergangenheit der Anteil der Reinigungsfälle ohne Fackelanschluss deutlich höher war. Für das Jahr 1990 wird ein Anteil von Reinigungsfällen ohne Fackelanschluss von 0,75 geschätzt (die entsprechenden Zeitreihen finden sich in Anhang D.1).

Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich Emissionen wie in Tabelle 20 dargestellt.

Die Emissionen aus der Reinigung von Rohöltanks sind hierbei vollständig der Kategorie 1.B.2.a.iv „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ zuzuordnen. Für die Zuordnung der Emissionen aus den weiteren Tanklagerkategorien, Halb- und Fertigproduktetanks, sonstige Tanklager und Lager bei sonstigen Mineralölverarbeitern wird die Aufteilung des Gesamtaufkommens an Mineralölprodukten auf die einzelnen Haupt- und Nebenprodukte aus der BAFA-Mineralölstatistik (Amtliche Mineralölstatistik für die Bundesrepublik Deutschland, Tabellenblatt 6j) herangezogen. Hieraus ergibt sich für das Verhältnis von Kraftstoffen (Ottokraftstoff,

⁸ Die schrittweise kombinierten Faktoren (Anteil jährlicher Reinigungen, Anteil Reinigungsfälle mit/ohne Fackelanschluss, Emissionsfaktor) lassen sich auch zu einem Emissionsfaktor aggregieren, der unmittelbar (ohne die rechnerischen Zwischenschritte) auf die Zeitreihe der Tanklagerkapazität anwendbar ist. Die entsprechende Tabelle findet sich in Anhang D.1.

Diesekraftstoff, Heizöl, Flugturbinenkraftstoff, etc.) zu chemischen Produkten (Rohbenzin, Schmierstoff, Wachse, etc.) ein Verhältnis des Gesamtaufkommens von 80:20, welches für die Aufteilung der Emissionen aus der Reinigung für die übrigen Tanklagerkategorien herangezogen wird. Diese Aufteilung ist in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 19: Aufteilung der Emissionen nach Tanklagerkategorie und Berichtskategorie

Kategorie	Rohöltank (Raffinerie) Emissionen	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) Emissionen	Sonstige Tanklager Emissionen	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern Emissionen
1.B.2.a.iv	100%	80%	80%	80%
2.B.10	0%	20%	20%	20%

Tabelle 20 zeigt die gesamten VOC-Emissionen. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) zum Methananteil in den VOC-Emissionen aus Rohöltanks von 5-10 % wird konservativ ein Anteil von 10 % Methan an den VOC-Emissionen aus Reinigungsvorgängen von Rohöltanks angenommen. Den Methananteil der VOC-Emissionen aus Mineralölprodukten gibt die Studie von Bender (2009) mit rund 5 % an; dieser Anteil wird hier ebenfalls angenommen.

Tabelle 20: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Tankreinigung – Ansatz 1

Berechnung über Tankbodenfläche

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Sonstige Tanklager Emissionen [kg]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern Emissionen [kg]
2021	9.075	12.486	13.404	228
2020	9.078	12.310	13.731	228
2019	9.100	12.304	13.821	228
2018	9.180	12.376	13.875	225
2017	9.290	12.488	13.872	348
2016	9.280	12.337	13.873	347
2015	9.744	13.070	13.661	347
2014	9.680	13.306	13.621	347
2013	9.786	13.390	13.633	345
2012	10.006	13.427	14.129	345
2011	9.940	13.582	13.689	176
2010	10.693	14.177	15.143	181
2009	11.175	14.694	15.595	187
2008	11.596	16.253	16.352	193
2007	11.880	16.790	17.374	197

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Sonstige Tankläger Emissionen [kg]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern Emissionen [kg]
2006	12.499	17.522	18.245	204
2005	12.899	18.055	18.773	208
2004	13.139	18.613	19.571	210
2003	13.377	19.500	20.468	237
2002	13.797	20.122	21.134	244
2001	14.059	20.949	21.904	390
2000	14.752*	21.855*	22.719*	422*
1999	15.444	22.761	23.535	454
1998	16.385	23.245	24.995	1.327
1997	17.564	23.991	25.004	1.533
1996	18.768	27.542	22.486	435
1995	20.368	28.871	23.111	446
1994	20.910	29.765	23.351	458
1993	21.711	30.866	23.875	472
1992	22.513*	31.334*	24.408*	448*
1991	23.314	31.802	24.941	424
1990	22.137	32.090	25.539	436

Quelle: eigene Berechnungen

* Für 1992 und 2000 fehlen die Daten zu Berechnung; die Werte für diese Jahre wurden als Mittel des Vor- und nachfolgendem Jahr berechnet.

Die aufgeführten VOC-Emissionen sind inklusive Methan. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) wird ein Anteil von 10 % für Reinigungsvorgängen von Rohöltanks und 5 % für VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tanks für Mineralölprodukte (vgl. hierzu obige Ausführungen im Text) angenommen.

Für den zweiten Berechnungsweg wird die jährlich gereinigte Tankkapazität aus Tabelle 5 mit dem Emissionsfaktor von 0,025 kg VOC je m² Tankvolumen multipliziert. Analog zu Ansatz 1 sind die so ermittelten theoretischen Gesamtemissionen dann um die durch das Abfackeln geminderten Emissionen zu korrigieren (Annahme entsprechend). Es ergeben sich Emissionen wie in Tabelle 21 dargestellt. Bzgl. der Aufteilung zwischen Mineralöl und chemischen Produkten gelten die Ausführungen zu den Berechnungen nach Ansatz 1 (s. Tabelle 19).

Tabelle 21: Zeitreihe VOC-Emissionen aus der Tankreinigung – Ansatz 2

Berechnung über Tankkapazität

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Sonstige Tanklager Emissionen [kg]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern Emissionen [kg]
2021	12.638	17.388	18.666	160
2020	12.642	17.143	19.122	160
2019	12.672	17.135	19.247	160
2018	12.784	17.234	19.323	158
2017	12.937	17.391	19.318	243
2016	12.923	17.181	19.319	243
2015	13.570	18.202	19.024	243
2014	13.481	18.531	18.969	243
2013	13.628	18.648	18.985	241
2012	13.934	18.698	19.676	241
2011	13.842	18.914	19.063	245
2010	14.891	19.743	21.088	252
2009	15.562	20.463	21.717	260
2008	16.148	22.634	22.771	268
2007	16.545	23.382	24.195	275
2006	17.407	24.402	25.408	283
2005	17.963	25.143	26.143	290
2004	18.297	25.920	27.255	292
2003	18.629	27.156	28.504	330
2002	19.213	28.022	29.432	340
2001	19.579	29.174	30.503	544
2000	20.543*	30.436*	31.639*	588*
1999	21.507	31.698	32.775	632
1998	22.818	32.371	34.808	1.848
1997	24.459	33.410	34.820	2.134
1996	26.137	38.355	31.314	606
1995	28.364	40.206	32.184	622
1994	29.120	41.451	32.519	638
1993	30.235	42.984	33.249	657
1992	31.351*	43.636*	33.991*	624*

Jahr	Rohöltank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Halb- und Fertigproduktetank (Raffinerie) Emissionen [kg]	Sonstige Tankläger Emissionen [kg]	Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern Emissionen [kg]
1991	32.468	44.288	34.733	590
1990	30.828	44.688	35.566	607

Quelle: Ökopol, eigene Berechnungen

* Für 1992 und 2000 fehlen die Daten zu Berechnung; die Werte für diese Jahre wurden als Mittel des Vor- und nachfolgendem Jahr berechnet.

Die aufgeführten VOC-Emissionen sind inklusive Methan. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) wird ein Anteil von 10 % für Reinigungsvorgängen von Rohöltanks und 5 % für VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tanks für Mineralölprodukte (vgl. hierzu obige Ausführungen im Text) angenommen.

Die Gesamtemissionen nach Ansatz 2 fallen um 38 % höher aus als die nach Ansatz 1 berechneten Emissionen.

3.2 Tankmotorschiffe

Entsprechend den Rechercheergebnissen von Abschnitt 2.2 können Emissionen aus der Tankreinigung vor einem Produktwechsel und zusätzlich aus geplanten Werftaufenthalten (zur Schiffsuntersuchung) resultieren.

Zur Berechnung können die Emissionsfaktoren von Bauer et al. (2010) (1.212-2.350 kg Emissionen pro Ventilierungsvorgang) herangezogen werden. Diese beziehen sich auf eine durchschnittliche Kapazität von Tankmotorschiffen von 1.780 t, entsprechend des Durchschnitts im Jahr 2009 (vgl. Abschnitt 2.2.2, Tabelle 7). Für die zu betrachtende Zeitreihe (1990-2021) sind die Emissionsfaktoren entsprechend der Entwicklung der durchschnittlichen Kapazitäten anzupassen (siehe hierzu Tabelle 43 in Anhang 0).

Die Zeitreihe der Emissionen findet sich in Tabelle 23. Die Berechnungen der Spalten zwei bis vier basieren auf den mittleren ermittelten Emissionsfaktoren sowie der mittleren Anzahl von emissionsrelevanten Vorgängen. In Spalte fünf und sechs sind die Gesamtemissionen auf Basis der unteren Werte für Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten bzw. auf Basis der oberen Werte für Emissionsfaktoren und Aktivitätsrate dargestellt.

Für die Zuordnung der Emissionen zu den Berichtskategorien 1.B.2.a.iv „Öl, Verarbeitung und Lagerung“, 1.B.2.a.v „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ sowie 2.B.10 „Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“ (einschließlich „Lagerung chemischer Produkte“) werden die der AR zugrunde gelegten Transportdaten herangezogen. Hierbei werden drei Gütergruppen unterschieden: NST7-022 Erdöl, NST7-072 Flüssige Mineralölerzeugnisse und NST7-073 Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse. Potenziell relevant hinsichtlich der Emissionen aus der Reinigung der Tanks von Tankmotorschiffen sind 1.B.2.a.v und 2.B.10 (vgl. EEA 2023). Für eine Aufteilung zwischen 1.B.2.a.v und 2.B.10 werden die Transport- bzw. Versandmengen (vgl. Ausführungen in Abschnitt 2.2.2) der drei Gütergruppen herangezogen. Die Erdölmengen sind vollständig 1.B.2.a.v zuzuordnen. Die größten Mengen finden sich in der Kategorie NST-072 „flüssige Mineralölerzeugnisse“. Dies umfasst „Motorentreibstoffe, Heizöle und andere Mineralöle“ (Destatis 2008), also im Schwerpunkt Produkte, die unter 1.B.2.a.v fallen. Die Mengen aus NST7-073 „gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse“ wiederum, wobei es sich um gasförmige Kohlenwasserstoffe ohne Erdgas handelt, können sowohl Brennstoffe wie bspw. Propan oder Butan als auch Inputs für die chemische Industrie umfassen. Für die Aufteilung auf die Berichtskategorien für die Gütergruppen werden die in Tabelle 22 aufgeführten Annahmen

getroffen. Auf Basis dieser Annahmen wurde anhand der im Jahr 2022 transportierten Mengen der Anteil der Berichtskategorien an den berechneten Emissionen berechnet.

Tabelle 22: Aufteilung der VOC-Emissionen nach Gütergruppen und Berichtskategorien

Kategorie	Erdöl	flüssige Mineralölerzeugnisse	gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse	Mengen-gewichtetes Mittel, Anteil an berechneten Emissionen
1.B.2.a.v	100 %	80-100 %	40-60 %	78-98 %
2.B.10	0 %	0-20 %	40-60 %	2-22 %

Quelle: eigene Darstellung entsprechend der vorstehenden Ausführungen im Text

Tabelle 23: Zeitreihe VOC-Emissionen Tankmotorschiffe

Jahr	Emissionen aus der Reinigung - Produktwechsel EF-Mittel, AR-Mittel [kg]	Emissionen aus der Reinigung - Werftaufenthalt EF-Mittel, AR-Mittel [kg]	Emissionen Reinigung Tankmotorschiffe gesamt [kg]	Emissionen gesamt, Min-Min Szenario [kg]	Emissionen gesamt, Max-Max Szenario [kg]
2021	573.707	109.543	453.768	191.671	825.838
2020	559.856	108.698	455.809	192.078	830.436
2019	521.016	111.193	475.903	199.764	868.562
2018	557.036	105.574	439.796	185.567	800.803
2017	598.903	108.847	498.134	206.530	914.108
2016	541.749	107.779	487.003	202.380	892.783
2015	544.947	106.249	476.813	198.392	873.624
2014	491.119	102.265	683.251	269.755	1.280.036
2013	463.518	100.616	668.554	264.467	1.251.507
2012	428.744	98.254	632.208	252.948	1.177.924
2011	401.966	104.146	662.610	261.381	1.241.802
2010	349.230	84.343	707.750	277.854	1.328.985
2009	371.295	88.740	649.528	257.680	1.214.456
2008	427.222	97.433	651.196	257.727	1.218.767
2007	457.459	101.970	593.384	236.700	1.106.972
2006	435.109	89.140	564.134	226.187	1.050.167
2005	437.001	91.511	526.998	213.153	975.875
2004	418.794	80.343	506.111	208.406	928.623
2003	371.165	71.883	433.573	177.216	796.828
2002	381.383	66.462	460.035	188.127	843.988

Jahr	Emissionen aus der Reinigung - Produktwechsel EF-Mittel, AR-Mittel [kg]	Emissionen aus der Reinigung - Werftaufenthalt EF-Mittel, AR-Mittel [kg]	Emissionen Reinigung Tankmotorschiffe gesamt [kg]	Emissionen gesamt, Min-Min Szenario [kg]	Emissionen gesamt, Max-Max Szenario [kg]
2001	371.369	59.692	524.655	213.685	962.727
2000	356.317	55.737	559.429	227.632	1.025.406
1999	361.676	60.128	524.249	211.577	962.747
1998	368.622	62.137	528.512	214.254	967.366
1997	385.386	64.560	499.137	200.712	915.288
1996	405.522	70.413	443.048	178.690	810.277
1995	408.054	71.208	447.845	178.927	820.982
1994	455.021	83.863	431.061	171.153	791.030
1993	412.776	80.141	412.054	163.500	755.269
1992	412.776*	82.405	421.804*	168.709	769.636
1991	412.776*	83.160	430.759*	172.869	783.855
1990	412.776*	84.065	449.946*	180.810	817.225

Quelle: Berechnungen von Ökopol.

*Die notwendigen Daten für die Berechnung der Emissionen aus der Reinigung beim Produktwechsel für die Jahre 1990-1992 waren nicht von Destatis verfügbar. Für 1990 bis 1992 wurden konstante Emissionen angenommen.

Die aufgeführten VOC-Emissionen sind inklusive Methan. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) wird ein Anteil von 10 % für Reinigungsvorgängen von Rohöltanks und 5 % für VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tanks für Mineralölprodukte (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 3.1) angenommen. Hier erscheint die Annahme eines durchschnittlichen Anteils von 7,5 % für die Emissionen, die 1.B.2.a.v zuzuordnen sind, zielführend.

3.3 Eisenbahnkesselwagen

Für eine Emissionsberechnung kann der Emissionsfaktor von Joas et al. (2004) herangezogen werden (Abschnitt 2.3.1), welcher bzgl. der Entwicklung der Kapazität der Eisenbahnkesselwagen anzupassen ist. Als Aktivitätsrate wird die Anzahl der Reinigungsvorgänge (vgl. Abschnitt 2.3.2) verwendet. Die entsprechende Zeitreihe der Emissionsfaktoren findet sich in Anhang D.3.

Weitere Änderungen, die sich über die zu betrachtende Zeitreihe ergeben, umfassen die Anzahl der Kesselwagen und das Reinigungsintervall sowie die Kapazität der Kesselwagen (vgl. Tabelle 15). Die Zeitreihe der Emissionen findet sich in Tabelle 25.

Die relevanten Berichtskategorien hier sind 1.B.2.a.v „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ sowie 2.B.10 „Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“ (einschließlich „Lagerung chemischer Produkte“).

Für die Aufteilung auf die Berichtskategorien werden die transportierten Mengen nach Gütergruppen mit der Eisenbahn in Deutschland herangezogen (Destatis, Beförderte Güter, Eisenbahngüterverkehr: Deutschland, Jahre, Güterabteilungen und -gruppen; Tabelle 46131-007). Hier unterschiedene relevante Gütergruppen sind gemeinsam mit ihrem Anteil der beförderten Menge dieser Gruppen sowie der Zuordnung zu den Berichtskategorien und der

resultierenden Aufteilung für die Emissionen entsprechend Tabelle 25 in folgender Tabelle (Tabelle 24) aufgeführt:

Tabelle 24: Aufteilung der Emissionen aus der Reinigung von Kesselwagen auf die Berichtskategorien

Gütergruppen	Anteil an beförderter Menge, 2023	Anteil 1.B.2.a.v	Anteil 2.B.10
Erdöl	2 %	100 %	0 %
Flüssige Mineralölerzeugnisse	92 %	80-100 %	0-20 %
Gasförmige, verflüssigte, verdichtete Mineralölerzeugnisse	6 %	40-60 %	40-60 %
Gesamt	100 %	78-98 %	2-22 %

Quelle: eigene Darstellung entsprechend der vorstehenden Ausführungen im Text

Tabelle 25: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Reinigung von Eisenbahnkesselwagen

Jahr	Emissionen MITTEL [kg]	Emissionen MIN [kg]	Emissionen MAX [kg]
2021	32.117	27.976	36.257
2020	32.292	28.308	36.275
2019	32.476	28.655	36.297
2018	32.671	29.019	36.323
2017	32.876	29.399	36.353
2016	33.093	29.798	36.388
2015	33.323	30.217	36.429
2014	33.566	30.658	36.475
2013	33.824	31.121	36.527
2012	34.096	31.608	36.585
2011	34.386	32.122	36.650
2010	34.694	32.665	36.722
2009	35.021	33.238	36.803
2008	35.369	33.846	36.892
2007	35.740	34.489	36.991
2006	36.136	35.172	37.100
2005	36.560	35.899	37.221
2004	37.014	36.673	37.354
2003	37.500	37.500	37.500
2002	36.775	36.425	37.124

Jahr	Emissionen MITTEL [kg]	Emissionen MIN [kg]	Emissionen MAX [kg]
2001	36.052	35.355	36.749
2000	35.333	34.290	36.376
1999	34.617	33.229	36.004
1998	33.904	32.174	35.634
1997	33.194	31.123	35.265
1996	32.487	30.077	34.898
1995	31.784	29.036	34.531
1994	31.083	28.000	34.167
1993	30.386	26.969	33.803
1992	29.692	25.942	33.441
1991	29.001	24.921	33.081
1990	28.313	23.904	32.722

Quelle: Berechnungen von Ökopol

Die aufgeführten VOC-Emissionen sind inklusive Methan. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) wird ein Anteil von 10 % für Reinigungsvorgängen von Rohöltanks und 5 % für VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tanks für Mineralölprodukte (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 3.1) angenommen. Hier erscheint die Annahme eines durchschnittlichen Anteils von 7,5 % für die Emissionen, die 1.B.2.a.v zuzuordnen sind, angemessen.

3.4 Tankwagen

Auf Grundlage der ermittelten Emissionsfaktoren (Abschnitt 2.4.1) und Aktivitätsraten (Abschnitt 2.4.2) kann eine Emissionsberechnung erfolgen. Wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, unterscheiden sich die Emissionsfaktoren je nach Reinigungsverfahren⁹. Bzgl. des Anteils der Reinigung unter Druck bestehen Unsicherheiten, den Einschätzungen der befragten Experten*Expertinnen folgend ist der Anteil eher gering. Als Ergebnis der Experten*Expertinnenbefragung wurde eine Bandbreite von 10-30 % festgehalten. Zusätzlich wird für die Emissionsberechnung eine Bandbreite von 5-50 % untersucht.

Eine ausreichend detaillierte Statistik zu transportierten Produkten als Grundlage für die Abschätzung der Aufteilung auf die Berichtskategorien ist nicht verfügbar. Die deutsche Güterverkehrsstatistik unterscheidet bei den transportierten Gütern nach den 20 NST 2007-Abteilungen wo „mineralische, chemische und Mineralölerzeugnisse“ eine Kategorie darstellen. Die im Rahmen der Recherchen von Abschnitt 2.4 befragten Akteure*Akteurinnen haben hier auf einen größeren Anteil des Transport von Mineralöl und Ottokraftstoffen gegenüber chemischen Produkten verwiesen, jedoch ohne nähere Quantifizierung. Vor diesem Hintergrund werden die in folgender Tabelle aufgeführten Spannbreiten vorgeschlagen.

⁹ Die schrittweise kombinierten Faktoren (Anteil Reinigungsverfahren, Emissionsfaktor) lassen sich auch zu einem Emissionsfaktor aggregieren, der unmittelbar (ohne die rechnerischen Zwischenschritte) auf die Zeitreihe der Reinigungshäufigkeit anwendbar ist. Die entsprechende Tabelle findet sich in Anhang D.1.

Tabelle 26: Aufteilung der Emissionen aus der Reinigung von Tankwagen auf die Berichtskategorien

Anteil 1.B.2.a.v	Anteil 2.B.10
60-90 %	10-40 %

Quelle: eigene Darstellung entsprechend der vorstehenden Ausführungen im Text

Tabelle 27: Zeitreihe der VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tankwagen

Jahr	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,05“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,1“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,3“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,5“ [kg]
2020	2.263.987	2.148.261	1.685.358	1.222.455
2019	2.226.789	2.112.965	1.657.667	1.202.370
2018	2.202.593	2.090.005	1.639.655	1.189.305
2017	2.192.662	2.080.582	1.632.262	1.183.943
2016	2.201.690	2.089.149	1.638.983	1.188.818
2015	2.221.733	2.108.167	1.653.904	1.199.640
2014	2.242.318	2.127.700	1.669.228	1.210.755
2013	2.255.319	2.140.037	1.678.906	1.217.775
2012	2.270.848	2.154.772	1.690.466	1.226.160
2011	2.279.155	2.162.653	1.696.649	1.230.645
2010	2.368.537	2.247.467	1.763.187	1.278.908
2009	2.499.269	2.371.517	1.860.507	1.349.498
2008	2.516.243	2.387.623	1.873.143	1.358.663
2007	2.843.797	2.698.434	2.116.981	1.535.528
2006	2.887.495	2.739.898	2.149.510	1.559.123
2005	2.980.669	2.828.309	2.218.871	1.609.433
2004	3.056.328	2.900.101	2.275.193	1.650.285
2003	3.133.070	2.972.920	2.332.321	1.691.723
2002	3.228.772	3.063.731	2.403.564	1.743.398
2001	3.329.169	3.158.996	2.478.302	1.797.608
2000	3.328.627	3.158.482	2.477.898	1.797.315
1999	3.436.969	3.261.286	2.558.550	1.855.815
1998	3.492.585	3.314.058	2.599.952	1.885.845
1997	3.525.268	3.345.071	2.624.282	1.903.493
1996	3.572.036	3.389.448	2.659.096	1.928.745
1995	3.676.947	3.488.996	2.737.194	1.985.393

Jahr	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,05“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,1“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,3“ [kg]	Emissionen bei Anteil „Reinigung unter Druck 0,5“ [kg]
1994	3.789.984	3.596.255	2.821.341	2.046.428
1993	3.754.592	3.562.673	2.794.995	2.027.318
1992	3.487.890	3.309.603	2.596.457	1.883.310
1991	3.064.634	2.907.982	2.281.376	1.654.770
1990	3.199.881	3.036.316	2.382.057	1.727.798

Quelle: Eigene Berechnungen

Die aufgeführten VOC-Emissionen sind inklusive Methan. Entsprechend der Empfehlung in der Studie von Bender (2009) wird ein Anteil von 10 % für Reinigungsvorgängen von Rohöltanks und 5 % für VOC-Emissionen aus der Reinigung von Tanks für Mineralölprodukte (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 3.1) angenommen. Hier erscheint die Annahme eines durchschnittlichen Anteils von 7,5 % für die Emissionen, die 1.B.2.a.v zuzuordnen sind, angemessen.

3.5 Pipelines

Es wird wie in Abschnitt 2.5 beschrieben davon ausgegangen, dass die Emissionen vernachlässigbar sind und mit null angesetzt werden können.

4 Bewertung der Ergebnisse und Schätzung der Unsicherheiten

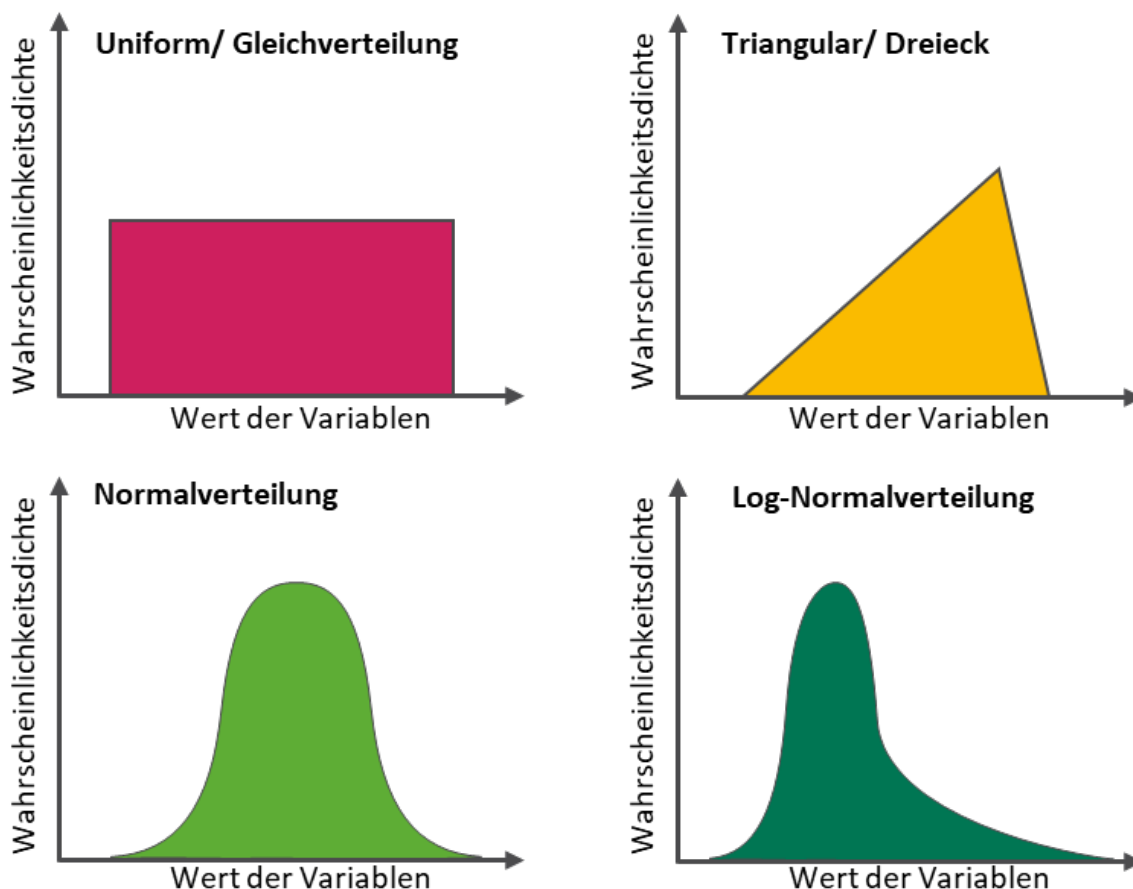
Die Emissionsberechnungen unter der Klimarahmenkonvention und des Genfer Luftreinhalteübereinkommens müssen transparent, vergleichbar, vollständig, konsistent und exakt sein. Im Zuge der Erfüllung der Berichtspflichten unter diesen Konventionen ist auch die Bestimmung der Unsicherheiten der berichteten Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren erforderlich. In diesem Kapitel werden die Unsicherheiten für die untersuchten Bereiche für das Jahr 2021 bestimmt.

Die Angabe von Unsicherheiten erfordert die Angabe der oberen und unteren Grenze des Unsicherheitsbereichs sowie die Verteilungsfunktion (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion). Verschiedene Beispiele für gängige Funktionen finden sich in Abbildung 14.

4.1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zeigt den Bereich und die Wahrscheinlichkeit der möglichen Werte an, die der Parameter (wie Emissionsfaktor oder Aktivitätsrate) annehmen kann. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann genutzt werden, um Unsicherheiten bzgl. Größen zu beschreiben, die feste Konstanten sind, deren Werte jedoch nicht genau bekannt sind (vgl. bspw. IPCC 2006).

Abbildung 14: Beispiele für gängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen



Quelle: Ökopol, nach IPCC (2006)

Bezüglich der Anwendung der dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen im Kontext der Emissionsberichterstattung werden in den IPCC-Leitlinien folgende Feststellungen getroffen (IPCC 2006):

- ▶ Die **Gleichverteilung** beschreibt Fälle, in denen für jeden Wert innerhalb eines Bereichs die gleiche Wahrscheinlichkeit gilt. Sie kann bspw. für Experten*Expertinnenurteile herangezogen werden, wenn eine obere und untere Grenze angegeben wurde.
- ▶ Die **Dreiecksverteilung** kann herangezogen werden, wenn Ober- und Untergrenzen und ein bevorzugter Wert von Experten*Expertinnen angegeben wurden, aber keine weiteren Informationen über die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion vorliegen.
- ▶ Die **Normalverteilung** ist am besten geeignet, wenn der Unsicherheitsbereich klein (Standardabweichung ≤ 30 % des Mittelwertes) und im Verhältnis zum Mittelwert symmetrisch ist. Die Normalverteilung ergibt sich in Situationen, in denen viele einzelne Inputs zu einer Gesamtunsicherheit beitragen und in denen keine der einzelnen Unsicherheiten die Gesamtunsicherheit dominiert. Eine Normalitätsannahme ist oft für viele Kategorien angemessen, bei denen der relative Unsicherheitsbereich klein ist, z. B. bei Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe und Aktivitätsdaten.
- ▶ Die **Lognormalverteilung** kann geeignet sein, wenn die Unsicherheiten für eine nicht-negative Variable groß und bekanntermaßen positiv schief sind. Im Gegensatz zur Normalverteilung, welche symmetrisch ist, kann die Lognormalverteilung nicht negativ werden und liefert insbesondere in Fällen mit größerer Unsicherheit sinnvollerer Ergebnisse.

Bezüglich der anzunehmenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion führen die IPCC-Leitlinien weiterhin folgendes aus (IPCC 2006):

- ▶ Manchmal besteht das einzige verfügbare Experten*Expertinnenurteil aus einer Spanne, die vielleicht zusammen mit einem wahrscheinlichsten Wert angegeben wird. Unter diesen Umständen gelten die folgenden Regeln als gute Praxis:
 - Wenn die Experten*Expertinnen nur einen oberen und einen unteren Wert angeben, ist davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gleichmäßig ist und die Spanne dem 95 %-Konfidenzintervall entspricht.
 - Wenn die Experten*Expertinnen auch einen höchstwahrscheinlichen Wert angeben (der häufig mit der Punktschätzung übereinstimmt, die bei der Erstellung der Bestandsaufnahme verwendet wurde), nehmen Sie eine dreieckige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion an, bei der die wahrscheinlichsten Werte als Modus verwendet werden. Dann gehen Sie davon aus, dass die oberen und unteren Werte jeweils 2,5 % ausschließen.
- ▶ Wenn die Unsicherheiten groß sind, nicht von einer symmetrischen Verteilung ausgegangen werden kann und eine positiv schiefe Verteilung sinnvoll erscheint, kann eine Lognormalverteilung geeignet sein.

Inwieweit von Experten*Expertinnen angegebene Spannen dabei tatsächlich dem 95 %-Konfidenzintervall gleichzusetzen sind, ist dabei jedoch unter Berücksichtigung der durchgeführten Gespräche zu bewerten. Alternativ kann anhand des mittleren Wertes die Spanne unter Verwendung der Guidebook-Vorschläge (Tabelle 28, Tabelle 29) berechnet werden. Auch wenn die Experten*Expertinnenangaben nicht direkt zu verwenden sind, sondern

mit weiteren Daten (Angaben aus Studien, Statistiken etc.) kombiniert werden, erscheint die Verwendung der Guidebook-Vorschläge (Tabelle 28, Tabelle 29) naheliegender.

4.2 Bestimmung der oberen und unteren Grenze des Unsicherheitsbereiches

Neben der Wahl der geeigneten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sind wie beschrieben der Mittelwert (mean), der Minimal- (min) und der Maximalwert (max) des Unsicherheitsbereiches zu definieren.

Grundsätzlich gilt entsprechend den Ausführungen der IPCC-Leitlinien (IPCC 2006) sowie des EMEP-Guidebooks (EEA 2023), dass die Unsicherheiten mit einem 95 %-Konfidenzintervall ausgedrückt werden sollen. Dieses 95 %-Konfidenzintervall wird durch die Konfidenzgrenzen festgelegt, die durch das 2,5-Perzentil und das 97,5-Perzentil der kumulativen Verteilungsfunktion definiert sind. Mit anderen Worten: Es ist gute Praxis, den Bereich einer unsicheren Menge innerhalb eines Inventars so auszudrücken, dass:

- ▶ mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit der tatsächliche Wert der geschätzten Menge innerhalb des durch die Konfidenzgrenzen definierten Intervalls liegt; und
- ▶ der tatsächliche Wert, sollte er außerhalb des angegebenen Bereichs liegen, mit gleicher Wahrscheinlichkeit über oder unter diesem liegt.

Die obere und untere Grenze des Konfidenzintervalls (für die hier erhobenen Parameter Emissionsfaktor bzw. Aktivitätsrate als EF_{\min} bzw. AR_{\min} und EF_{\max} bzw. AR_{\max}) sind absolute Werte in der gleichen Einheit wie der Mittelwert (EF_{mean} bzw. AR_{mean}). Bei symmetrischen Funktionen (bspw. der Normalverteilung) kann das Konfidenzintervall als Prozentsatz des Mittelwertes angegeben werden (bspw. $\pm 10\%$ oder $\pm 30\%$). Bei nicht-symmetrischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen müssen obere und untere Grenze des Konfidenzintervalls separat angegeben werden (bspw. -10% , $+30\%$); der Unsicherheitsbereich kann also neben den absoluten oberen und unteren Schranken (EF_{\min} bzw. AR_{\min} und EF_{\max} bzw. AR_{\max}) durch die prozentuale Abweichung nach oben und unten (U_{\min} und U_{\max}) beschrieben werden. Das EMEP-Guidebook (EEA 2023) wiederum gibt Bandbreiten für die durchschnittliche prozentuale Abweichung an (siehe Tabelle 28 und Tabelle 29). Für die Verwendung zur Annäherung der Unsicherheiten wird daher vorgeschlagen, aus den angegebenen Bandbreiten zunächst eine durchschnittliche Unsicherheit ($(\min + \max)/2$) zu berechnen.

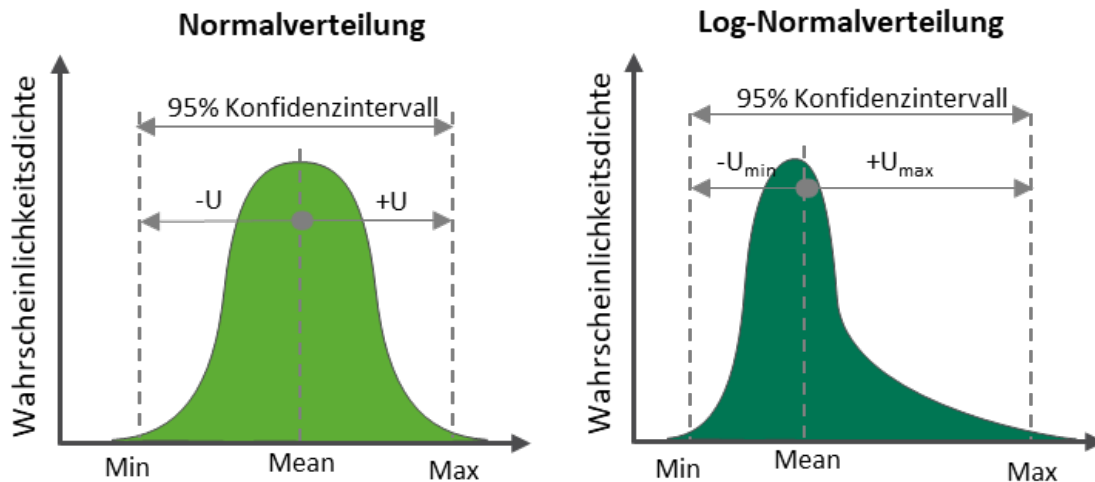
Für die Berechnung der prozentualen Abweichung des Unsicherheitsbereiches nach oben und unten (U_{\min} und U_{\max}) auf Basis von Mittelwert sowie Minimum und Maximum gilt folgendes (vgl. Ökopool und TNO 2019):

- ▶ Untere Schranke: $U_{\min} = (1 - \text{Min} / \text{Mean})$
[mit $\text{Min} = EF_{\min}$ bzw. AR_{\min} und $\text{Mean} = EF_{\text{mean}}$ bzw. AR_{mean}]
- ▶ Obere Schranke: $U_{\max} = (\text{Max} / \text{Mean} - 1)$
[mit $\text{Max} = EF_{\max}$ bzw. AR_{\max} und $\text{Mean} = EF_{\text{mean}}$ bzw. AR_{mean}]

Analog dem beschriebenen Vorgehen im Vorhaben „Wissenschaftlich-methodische Grundlagen der Inventarverbesserung“ (Ökopool und TNO 2019) kann bei angenommener Normalverteilung die durchschnittliche Unsicherheit als $(U = (\min + \max)/2)$ berechnet werden. Bei angenommener logarithmischer Normalverteilung sind die Min und Max-Werte des Unsicherheitsbereiches (U_{\min} und U_{\max}) zu verwenden, um eine durchschnittliche Unsicherheit zu berechnen. Diese wird dann herangezogen, um die Standardabweichung (SD) und die 2,5 % und 97,5 % Schranken (EF_{\min} bzw. AR_{\min} und EF_{\max} bzw. AR_{\max}) zu berechnen (unter Verwendung der

Standard-Lognormalverteilungsfunktion in Excel). Die resultierenden prozentualen Min-/Max-Werte weichen von den ursprünglichen Min-/Max-Werten ab, was jedoch durch die Form der logarithmischen Normalverteilung verursacht wird.

Abbildung 15: Konfidenzintervall, obere und untere Grenze veranschaulicht am Beispiel Normal- und Lognormalverteilung



Quelle: Ökopol in Anlehnung an (IPCC 2006)

Die obere und untere Grenze des Unsicherheitsbereichs EF/AR_{Min} bzw. EF/AR_{Max} können ggf. auch als Ergebnis der Datenerhebung/Bestandsaufnahme vorliegen (bspw. als Experten*Expertinnenangabe).

In anderen Fällen liegt nur eine Punktschätzung vor bzw. eine Schätzung für einen Mittelwert (mean). In diesem Fall können die prozentualen Unsicherheitsangaben des EMEP-Guidebooks (siehe Ausführungen in den folgenden Abschnitten) herangezogen werden.

Um von Mean (EF_{mean} bzw. AR_{mean}) und durchschnittlichem prozentualen Unsicherheitsbereich definiert durch U_{min} und U_{max} zu den absoluten Angaben für EF/AR_{Min} bzw. EF/AR_{Max} zu kommen, sind die vorstehenden Formeln umzustellen:

- ▶ $Min_{EF/AR} = Mean_{EF/AR} * (1 - U_{min})$
- ▶ $Max_{EF/AR} = Mean_{EF/AR} * (1 + U_{max})$

4.3 Vorgehen zur Bestimmung der Unsicherheitsbereiche

Ausgehend von der Datenerhebung zu den Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten für die untersuchten Bereiche (siehe Kapitel 2) sind jeweils Unsicherheitsbereiche zu bestimmen.

Hierbei ergeben sich für Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Datenherkunft.

4.3.1 Aktivitätsdaten

Aktivitätsdaten werden i.d.R. aus Statistiken abgeleitet (bspw. Energiestatistiken und -bilanzen, wirtschaftliche Produktionsstatistiken, Bevölkerungsstatistiken usw.; hier speziell Statistiken zu Flottenbeständen, zu Transportaktivitäten etc.).

Für Statistiken (und sonstige Datenquellen für Aktivitätsdaten), die keine Angaben zu Unsicherheiten machen, werden im EMEP-Guidebook folgende Unsicherheitsbereiche zur Anwendung vorgeschlagen (EEA 2023).

Tabelle 28: Vorgeschlagene Unsicherheitsbereiche des EMEP-Guidebooks für Aktivitätsdaten

Datenquelle	Unsicherheitsbereich	Bemerkung
Nationale Statistiken	0-2 %	Bspw. KBA-Statistiken, BAFA-Statistiken, Destatis-Statistiken
Aktualisierung der Vorjahresstatistik anhand ökonomischer Wachstumsfaktoren	0-2 %	Bspw. zuvor genannte Quellen, fortgeschrieben anhand BIP-Entwicklung oder anderer wirtschaftlicher Kennzahlen
IEA Energiestatistiken/Bilanzen	OECD: 2-3 %	-
UN Statistische Datenbanken	5-10 %	-
Default Werte, andere Sektoren und Datenquellen	30-100 %	Alle sonstigen Datenquellen, wie Informationen von Verbänden, Expertenauskünfte etc.

Quelle: EEA 2023

Für die für die Aktivitätsraten herangezogenen nationalen Statistiken erscheint die Verwendung dieser Unsicherheitsbereiche plausibel.

Teilweise wurden in der Bestandsaufnahme jedoch Statistiken mit Experten*Expertinnenschätzungen kombiniert, um die für die Emissionsberechnung notwendigen Aktivitätsdaten zu erhalten. In diesem Fall ist die Spanne der untersten Zeile der Tabelle 28 für „alle sonstigen Datenquellen“ zu verwenden.

4.3.2 Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren werden i.d.R. auf Basis von Messungen, technischen Berechnungen, technischen Dokumenten und Studien und/oder Annahmen abgeschätzt (vgl. Abschnitt 2).

Das EMEP-Guidebook (EEA 2023) unterscheidet fünf Arten von Datenquellen für die Abschätzung von Emissionsfaktoren, denen die folgenden Unsicherheitsbereiche zugeordnet werden:

Tabelle 29: Vorgeschlagene Unsicherheitsbereiche des EMEP-Guidebooks für Emissionsfaktoren

Bewertung	Definition	Unsicherheitsbereich
A	Eine Schätzung, die sich auf eine große Anzahl von Messungen stützt, die in einer großen Anzahl von Anlagen oder einzelnen Quellen über ein umfassendes Spektrum von Betriebsbedingungen durchgeführt wurden, die den Sektor vollständig repräsentieren.	10 bis 30 %
B	Eine Schätzung, die auf einer großen Anzahl von Messungen bei einer großen Anzahl von Anlagen oder einzelnen Quellen in einem Bereich von Betriebsbedingungen beruht, die einen großen Teil des Sektors repräsentieren.	20 bis 60 %
C	Eine Schätzung auf der Grundlage einer Reihe von Messungen, die an einer kleinen Anzahl repräsentativer Einrichtungen oder	50 bis 200 %

Bewertung	Definition	Unsicherheitsbereich
	einzelner Quellen in einem kleineren Bereich von Betriebsbedingungen vorgenommen wurden, oder ein technisches Urteil auf der Grundlage einer Reihe von relevanten Fakten. Eine Schätzung, die auf einer großen Anzahl von Messungen über einen Bereich von Bedingungen für eine Quelle basiert, die komplex und/oder variabel ist.	
D	Eine Schätzung, die auf einzelnen Messungen beruht, oder eine technische Berechnung, die aus einer Reihe relevanter Fakten abgeleitet wird. Eine Schätzung, die auf einer großen Anzahl von Messungen über einen Bereich von Bedingungen für eine Quelle basiert, die besonders komplex und/oder variabel ist.	100-300 %
E	Eine Schätzung auf der Grundlage einer technischen Berechnung, die nur auf Annahmen beruht. Eine Schätzung auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Messungen für eine Quelle, die besonders komplex und/oder variabel ist.	Faktor 10 (Größenordnung)

Quelle: EEA 2023

I.d.R. wurden bei den vorgenommenen Recherchen Berechnungen auf Basis von Angaben aus Studien/Literatur und/oder Experten*Expertinnenauskünften durchgeführt. Dies entspricht am ehesten dem Typ D aus Tabelle 29.

4.4 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager

4.4.1 Unsicherheit des Emissionsfaktors

Die Zeitreihe für die Emissionsfaktoren der Reinigung von Raffinerietanklagern beruht auf der DGMK-Studie (Mueller-Heuser et al. 2000). Der Faktor wurde anhand umfangreicher Betrachtung der Praxis und ergänzender Berechnungen ermittelt. Er wurde mit auf Basis von Experten*Expertinnenbefragungen erhobenen Annahmen zum Anteil von Reinigungsvorgängen mit Daten zum Abfackeln der Emissionen kombiniert.

Hier erfolgt eine Zuordnung der Datengrundlage zu Typ „D“ aus Tabelle 29 („Eine technische Berechnung, die aus einer Reihe relevanter Fakten abgeleitet wird.“) mit einer Unsicherheit von 100-300 %. Es werden durchschnittlich 200 % angenommen. Aufgrund der Größe der Unsicherheit wird eine Lognormalverteilung angenommen.

Es wurden zwei mögliche Emissionsfaktoren mit unterschiedlicher Bezugsgröße in der Bestandsaufnahme ermittelt: 0,5 kg VOC je m² Tankbodenfläche sowie 0,025 kg VOC je m³ Tankkapazität. Für die beiden Emissionsfaktoren sind die ermittelten Unsicherheitsbereiche in folgender Tabelle angegeben.

Tabelle 30: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Raffinerietanks und raffinerieferne Tanklager

EF Bezug	EF _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
Tankbodenfläche	0,5	0,067	2	177	86,6	267	Lognormal
Tankkapazität	0,025	0,003	0,092	177	86,6	267	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Quelle: Ökopool entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.4.2 Unsicherheit der Aktivitätsdaten

Entsprechend den beiden Varianten von Emissionsfaktoren (mit Bezug auf Tankbodenfläche und Tankkapazität) liegen zwei Varianten für die Aktivitätsrate vor. Es sind die „jährlich durchgeführte Tankreinigungen“, die multipliziert mit der durchschnittlichen Tankbodenfläche die Bezugsgröße für die Emissionsberechnung auf Basis derselben liefern sowie das „gereinigte Tankvolumen“.

Grundlage für die Aktivitätsrate „jährlich durchgeführte Tankreinigungen“ sind die BAFA-Statistik zu Lagertankkapazitäten sowie Experten*Expertinnenangaben und Literaturangaben, auf deren Basis schließlich die Gesamtzahl der jährlich durchgeführten Tankreinigungen bestimmt wird.

Entsprechend folgt eine Zuordnung zu Typ „Default Werte, andere Sektoren und Datenquellen“ aus Tabelle 28 („Alle sonstigen Datenquellen, wie Informationen von Verbänden, Experten*Expertinnenauskünfte etc.“) mit einem Unsicherheitsbereich von 30 bis 100 %. Hier werden durchschnittlich 65 % angenommen.

Aufgrund der Größe der Unsicherheit wird eine Lognormalverteilung angenommen.

Die entsprechend ermittelten Unsicherheitsbereiche finden sich in folgender Tabelle. Die Angaben finden sich hier jeweils für die beiden Varianten der Aktivitätsrate und die verschiedenen betrachteten Tankarten.

Tabelle 31: Berechnung der Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Rohöltanks (Raffinerien)

Tankart	AR Variante	AR _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
Rohöltank	Tankreinigungen	29	14,6	52	65	49,6	79	Lognormal
Rohöltank	Tankvolumen	1.006.024	506.985	1.798.482	65	49,6	79	Lognormal
Halb- und Fertigproduktetank	Tankreinigungen	40	20	72	65	49,6	79	Lognormal
Halb- und Fertigproduktetank	Tankvolumen	1.384.118	697.525	2.474.406	65	49,6	79	Lognormal
Sonstige Tankläger	Tankreinigungen	42	21	75	65	49,6	79	Lognormal
Sonstige Tankläger	Tankvolumen	1.485.846	748.791	2.656.267	65	49,6	79	Lognormal
Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern	Tankreinigungen	0	0	1	65	49,6	79	Lognormal
Läger bei sonstigen Mineralölverarbeitern	Tankvolumen	12.710	6.405	22.722	65	49,6	79	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Quelle: Ökopool entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.5 Tankmotorschiffe

4.5.1 Unsicherheit des Emissionsfaktors

Der zur Berechnung der Emissionen verwendete Emissionsfaktor (Emissionen pro Tankreinigung in kg) basiert auf der Studie von Bauer et al. (2010) und wurde unter Berücksichtigung der Kapazitätsentwicklung angepasst. Für das Jahr 2021 ergab sich so ein Emissionsfaktor von durchschnittlich 1.913 kg/Reinigungsvorgang.

Dieser Emissionsfaktor ist Typ „D“ aus Tabelle 29 zuzuordnen („Eine technische Berechnung, die aus einer Reihe relevanter Fakten abgeleitet wird.“) mit einer Unsicherheit von 100-300 %. Hier werden durchschnittlich 200 % angenommen. Aufgrund der Größe der Unsicherheit wird eine Lognormalverteilung angenommen. Der hieraus resultierende Unsicherheitsbereich ist in der folgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 32: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Tankmotorschiffe

Größe	EF _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
Emissionen (kg) pro Reinigungsvorgang	1.913	256	7.011	177	86,6	267	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Quelle: Ökopool entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.5.2 Unsicherheit der Aktivitätsdaten

Bei der Bestimmung der Aktivitätsrate zur Innenraumtankreinigung von Tankmotorschiffen wurde zwischen Reinigungen von Tankmotorschiffen wegen Produktwechsel und Reinigungen bei Werftaufenthalten unterschieden.

Bezüglich der Reinigungen von Tankmotorschiffen wegen Produktwechsel wurden zunächst verschiedene Statistiken herangezogen (Destatis, WSV). Diese wurden dann mit Statistiken der BAG zur Schiffsauslastung und schließlich mit Experten*Expertinnenschätzungen zur relativen Häufigkeit von Reinigungen kombiniert. Während das EMEP-Guidebook (siehe Tabelle 28) für nationale Statistiken einen Unsicherheitsbereich von 0-2 % vorschlägt, werden für Expertenauskünfte 30-100 % angegeben. Da die nationalen Statistiken hier mit Experten*Expertinnenschätzungen kombiniert wurden, wird der Wert des EMEP-Guidebooks für Experten*Expertinnenauskünfte herangezogen, mit einer mittleren Unsicherheit von 65 %. Bei dieser Größe wird wiederum eine Lognormalverteilung angenommen.

In der Herleitung der Aktivitätsrate (Abschnitt 2.2.2) wurde auf Grundlage der verfügbaren Daten und Informationen ebenfalls eine Spanne für die Aktivitätsrate berechnet. Zwar bieten die IPCC-Leitlinien einen möglichen Ansatz, um auf Basis von Spannbreiten aus Experten*Expertinnenbefragungen Unsicherheitsannahmen abzuleiten (Verwendung der Spanne als Gleichverteilung), jedoch liegt hier eine Kombination aus verschiedenen Statistiken, Experten*Expertinnenangaben und Berechnungen vor, weshalb eine Anwendung dieses Ansatzes nicht plausibel erscheint. Dennoch lässt sich feststellen, dass das auf Basis der mittleren Unsicherheit berechnete Intervall (151 bis 536) nicht allzu stark von der berechneten Spanne (150 bis 450) abweicht.

Die Anzahl der Werftaufenthalte wurde ebenfalls anhand von Statistiken und Angaben aus Studien bzw. von Experten*Expertinnen berechnet. Analog zum Produktwechsel wird auch hier

mit einer mittleren Unsicherheit von 65 % gerechnet und eine Lognormalverteilung angenommen.

Die Unsicherheiten sind in folgender Tabelle dokumentiert.

Tabelle 33: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Tankmotorschiffe

Größe	AR _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
Produktwechsel	300	151	536	65	49,6	79	Lognormal
Werftaufenthalt	57	29	102	65	49,6	79	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Quelle: Ökopol entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.6 Eisenbahnkesselwagen

4.6.1 Unsicherheit des Emissionsfaktors

Der zur Berechnung der Emissionen aus der Innenraumtankreinigung von Eisenbahnkesselwagen verwendete Emissionsfaktor basiert auf der Studie von Joas et al. (2004). Angepasst wurde der Emissionsfaktor unter Berücksichtigung der Kapazitätsentwicklung, welche anhand von Experten*Expertinnengesprächen bestimmt wurde. Dieser Emissionsfaktor ist Typ „D“ aus Tabelle 29 zuzuordnen („Eine technische Berechnung, die aus einer Reihe relevanter Fakten abgeleitet wird.“) mit einer Unsicherheit von 100-300 %. Hier werden durchschnittlich 200 % und eine Lognormalverteilung angenommen. Die Unsicherheiten sind in folgender Tabelle dokumentiert.

Tabelle 34: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Eisenbahnkesselwagen

EF _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
15,7	2	58	177	86,6	267	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Berechnet durch Ökopol entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.6.2 Unsicherheit der Aktivitätsdaten

Zur Bestimmung der Aktivitätsrate (Anzahl der Reinigungsvorgänge) musste zunächst auf Basis von Studien und Verbandsinformationen eine Zeitreihe für die Entwicklung des Bestands an Kesselwagen in Deutschland hergeleitet werden, die dann mit Experten*Expertinnenangaben zum Reinigungsintervall kombiniert wurde (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Die so bestimmten Aktivitätsdaten sind dem Unsicherheitsbereich 30-100 % des EMEP-Guidebook für „Alle sonstigen Datenquellen, wie Informationen von Verbänden, Experten*Expertinnenauskünfte etc.“ (Tabelle 28) zuzuordnen. Analog zum Vorgehen bei den Unsicherheiten der Aktivitätsraten für Raffinerietanklager (Abschnitt 4.4.2) und Tankmotorschiffe (Abschnitt 0), die dem gleichen Unsicherheitsbereich zugeordnet wurden, wird mit 65 % Unsicherheit und Lognormalverteilung gerechnet. Die Unsicherheitsangaben finden sich in folgender Tabelle.

Tabelle 35: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Eisenbahnkesselwagen

AR _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
2.050	1.033	3.665	65	49,6	79	Lognormal

Bezugsjahr: 2021.

Quelle: Ökopol entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.7 Tankwagen

4.7.1 Unsicherheit des Emissionsfaktors

Der Emissionsfaktor für die Emissionen der Innenraumtankreinigung von Tankwagen (Straßentankfahrzeugen) wurde auf Basis von Experten*Expertinnenauskünften berechnet. Dies entspricht dem Typ D (100-300 %) von Tabelle 29; wobei auch hier mit 200 % und Lognormalverteilung gerechnet wird.

Der entsprechend berechnete Unsicherheitsbereich findet sich in folgender Tabelle.

Tabelle 36: Unsicherheiten des Emissionsfaktors für Tankwagen

EF _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
3,65	0,5	13	177	87	267	Lognormal

Quelle: Ökopol entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.7.2 Unsicherheit der Aktivitätsdaten

Die Aktivitätsrate (Anzahl Reinigungsvorgänge) wurde auf Basis nationaler Statistiken (KBA, Bestand an Tankfahrzeugen und -hängern) in Kombination mit experten*expertinnengestützten Annahmen zur Reinigungshäufigkeit bestimmt.

Aufgrund der Kombination mit Experten*Expertinnenauskünften wird hier die Guidebook-Unsicherheit für „alle sonstigen Datenquellen“ von 30-100 % (im Mittel 65 %) angenommen (vgl. Tabelle 28). Aufgrund der Größe der Unsicherheit wird zudem eine Lognormalverteilung angenommen.

Da eine Berechnung hier nur bis zum Jahr 2020 möglich war, beziehen sich die Angaben hier abweichend vom sonstigen Vorgehen auf 2020.

Tabelle 37: Unsicherheiten der Aktivitätsrate für Tankwagen

AR _{MEAN}	AR _{Min}	AR _{Max}	U _{avg}	U _{min}	U _{max}	Verteilung
651.976	328.563	1.165.546	65	49,6	79	Lognormal

Bezugsjahr: 2020.

Quelle: Ökopol entsprechend dem in den Abschnitten 4.1 bis 4.3 beschriebenen Vorgehen und den vorstehenden beschriebenen Annahmen.

4.8 Pipelines

Für Pipelines wird, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, davon ausgegangen, dass die Emissionen vernachlässigbar sind und mit null angesetzt werden können. Daher erfolgt keine weitere Beschreibung des Unsicherheitsbereiches.

5 Quellenverzeichnis

BAG (2019a): Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2018. Online verfügbar unter https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Jahresberichte/Jahr_2018.pdf;jsessionid=46AD83816BA197FC691D205CA0F951AD.live21322?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

BAG (2019b): Marktbeobachtung Güterverkehr. Marktanteilsentwicklung in der Binnenschifffahrt auf deutschen Wasserstraßen. Hg. v. Bundesamt für Güterverkehr. Köln. Online verfügbar unter https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Sonderberichte/Marktanteilsentwicklung_Binnenschifffahrt.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 11.10.2023.

BAG (2020): Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2019. Köln. Online verfügbar unter https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Jahresberichte/Jahr_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

BAG (2022): Marktbeobachtung Güterverkehr. Jahresbericht 2021. Online verfügbar unter https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Jahresberichte/Jahr_2021.pdf;jsessionid=787DD38A6AC90519C199083E59073F46.live11294?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

BArbBl (2002): Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten: Füllstellen, Entleerstellen und Flugfeldbetankungsstellen - TRbF 30. Bundesarbeitsblatt. Hg. v. BMAS. Berlin.

Bauer, S.; Polcher, A.; Greßmann, A. (2010): Evaluierung der Anforderungen der 20. BImSchV für Binnentankschiffe im Hinblick auf die Wirksamkeit der Emissionsminderung klimarelevanter Gase. Abschlussbericht, FKZ 3709 45 326. BiPRO. München, zuletzt geprüft am 16.01.2023.

Bauer, Sonja; Greßmann, Alexander (2014): Machbarkeitsstudie zur Einrichtung und zum Betrieb von Abgasreinigungsanlagen für die Nutzung durch Tankschiffe im deutschen Teil des Rheinstromgebietes. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). BiPRO. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 32/2014). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2014_machbarkeitsstudie_zur_einrichtung_und_betrieb_von_abgasreinigungsanlagen.pdf, zuletzt geprüft am 16.01.2023.

Bender, Matthias (2009): Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCCC- und UNECE-Berichterstattung. Teilbericht Lageranlagen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Müller-BBM GmbH. Dessau (UBA-Texte, 43/2009).

BfG (2022a): Niedrigwasserbericht. Berichtsperiode 28.07.-04.08.2022. Koblenz. Online verfügbar unter https://www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/220623_nw_download7.pdf;jsessionid=AEF71D0470B734D7C86E6D8F95CF1003.live11313?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

BfG (2022b): Niedrigwasserbericht. Niedrigwasser legt eine Verschnaufspause ein. Koblenz. Online verfügbar unter https://www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/220623_nw_download13.pdf;jsessionid=AEF71D0470B734D7C86E6D8F95CF1003.live11313?__blob=publicationFile.

BfG (2023): FAQ Niedrigwasser in Bundeswasserstraßen. Koblenz. Online verfügbar unter https://www.bafg.de/DE/07_Nachrichten/NW-FAQ_Download.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.11.2023.

Buck, Ab de; Hoen, Maarten; den Boer, Eelco (2013): Update estimate emissions degassing inland tank vessels. Hg. v. CE Delft. Delft. Online verfügbar unter https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_3A78_Update_estimate_emissions_degassing_inland_tank_vessels_def.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

BUND (2019): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Claudia Müller, Steffi Lemke, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 19/6799 –. Entgasung von Binnenschiffen (Drucksache, 10/7179).

CDNI (2014): Umgang mit Abfällen aus dem Ladungsbereich. Juli 2014. Online verfügbar unter <https://www.cdni-iwt.org/wp-content/uploads/2015/07/Brochure-CDNI-partie-B-DE.pdf>, zuletzt geprüft am 01.06.2023.

CDNI (2021): Bestandsaufnahme der bestehenden Entgasungsstellen. Juni 2021. Online verfügbar unter https://www.cdni-iwt.org/wp-content/uploads/2021/06/carto-degazage_de.pdf, zuletzt geprüft am 01.06.2023.

concaawe (2017): Air pollutant emission estimation methods for E-PRTR reporting by refineries. Unter Mitarbeit von A. Bakker, E. Benavente, B. Caamano, O. Duclaux, M. Durand, L. Fragu et al. Brüssel. Online verfügbar unter https://www.concaawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_17-4.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

Destatis (2008): Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik – NST-2007. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/nsz-2007.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 03.06.2024.

EEA (2023): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023>, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

en2x (2023): Statistischer Jahresreport. Hg. v. en2x – Wirtschaftsverband Fuels und Energie e. V. Berlin. Online verfügbar unter https://en2x.de/wp-content/uploads/2023/06/230622_en2x_Statistik-Report_Einzelseiten.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2024.

Eurostat (1999): Innergemeinschaftliche Lieferung von Mineralölzeugnissen. Unter Mitarbeit von Emilie Siebenaller. Hg. v. Eurostat. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3433488/5244284/CA-NQ-99-010-DE.PDF.pdf/ab090561-9154-4cd6-a47a-c7b27f7e6cab?t=1414687118000>, zuletzt geprüft am 11.10.2023.

Eurostat (2002): Innergemeinschaftliche Lieferung von Mineralölzeugnissen. Unter Mitarbeit von Emilie Siebenaller. Hg. v. Eurostat. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/fe5532-6326-44bf-95e3-48fcbc1c4494/language-de>, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Online verfügbar unter https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2024.

Joas, Reinhard; Potrykus, Alexander; Schott, Rudolf; Wenzel, Stephan (2004): VOC-Minderungspotenzial beim Transport und Umschlag von Mineralölprodukten mittels Kesselwagen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). BiPRO. Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_12-04_komplett_neu.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

Mueller-Heuser, Gerd; Altmann, Bernd-Rüdiger; Arp, Joachim; Schönwald, Henning (2000): Immissionsschutz und Arbeitsschutz bei der Reinigung von Rohöltanks (mit Berechnungsbeispielen). Fortschreibung; DGMK-Forschungsbericht 499-01. Als Ms. gedr. Hamburg: DGMK (Bericht / DGMK, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V, 499,1).

OCIMF (2019): Volatile Organic Compound Emissions from Cargo Systems on Oil Tankers. Hg. v. Oil Companies International Marine Forum. Online verfügbar unter <https://www.ocimf.org/document-library/60-volatile-organic-compound-emissions-from-cargo-systems-on-oil-tankers/file>, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

Ökopol; TNO (2019): Wissenschaftlich-methodische Grundlagen der Inventarverbesserung zur Umsetzung der Hinweise aus den Inventarüberprüfungen 2016 und 2017. Abschlussprojekt zum REFO-Plan Vorhaben FKZ 3717 41 105 0. Unter Mitarbeit von Till Zimmermann, Christian Tebert, Christiane Schneider, Nicola Toenges-Schuller, Rianne Dröge, Peter Coenen et al. Ökopol Institut für Ökologie und Politik. Hamburg.

Sauter, Peter (2009): Löschen der Schiffe und Behandlung der Ladungsrückstände. Port of Switzerland. Online verfügbar unter https://www.ccr-zkr.org/temp/wrshp051109/15_Psauter_de.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

scinexx (2009): Deutschland im Netz. Online verfügbar unter <https://www.scinexx.de/dossierartikel/deutschland-im-netz/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2018, zuletzt geprüft am 18.06.2024.

US EPA (1995): Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42. Online verfügbar unter https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/toc_kwrdr.pdf, zuletzt geprüft am 04.12.2023.

WSV (2014): Veränderungen des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte im Jahr 2013. Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Bonn. Online verfügbar unter https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Binnenschiffsbestandsdatei/2013.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 31.05.2023.

WSV (2018): Veränderungen des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte im Jahr 2017. Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Bonn. Online verfügbar unter https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Binnenschiffsbestandsdatei/2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 31.05.2023.

WSV (2022): Veränderung des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte im Jahr 2021. Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Bonn. Online verfügbar unter https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Binnenschiffsbestandsdatei/2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 22.02.2024.

ZTG (2023): Telefonische Anfrage von Ökopol zu Emissionen bei der Tankstellen-Tankreinigung. Zentralverband des Tankstellengewerbes e.V. (ZTG), Bonn, 06.07.2023

A Anhang – Raffinerien in Deutschland

Tabelle 38: Raffinerien, deren Emissionserklärungen vorlagen

Raffinerien	Anschrift
Bayern Werk/Arbeitsstätte 1	Standort anonymisiert
Bayern Werk/Arbeitsstätte 2	Standort anonymisiert
Bayern Werk/Arbeitsstätte 3	Standort anonymisiert
Bayern Werk/Arbeitsstätte 4	Standort anonymisiert
Bayern Werk/Arbeitsstätte 5	Standort anonymisiert
Bayern Werk/Arbeitsstätte 6	Standort anonymisiert
BP Emsland/BP Lingen	Raffineriestraße, 49808 Lingen (Ems)
H&R Ölwerke Schindler GmbH	Neuhöfer Brückenstraße 127-152, 21107 Hamburg
Holborn Europa Raffinerie GmbH	Moorburger Straße 16, 21079 Hamburg
MIRO-Mineralölraffinerie Werk 1 Oberrhein GmbH & Co.KG	Nördliche Raffineriestr. 1, 76187 Karlsruhe
MIRO-Mineralölraffinerie Werk 2 Oberrhein GmbH & Co.KG	ESSO-Str. 1, 76187 Karlsruhe
Nynas GmbH & Co. KG Raffinerie Harburg	Hohe-Schaar-Straße 34, 21107 Hamburg
PCK Raffinerie GmbH Schwedt	Passower Chaussee 111, 16303 Schwedt/Oder
RKB Raffinerie-Kraftwerks Betriebs GmbH	Bau 3691, Werkteil II, 06237 Leuna
RUHR OEL GmbH Werk Horst	Johannastr. 2-8, 45899 Gelsenkirchen (Horst)
RUHR OEL GMBH Werk Scholven	Pawiker Str. 30, 45896 Gelsenkirchen (Scholven)
Sasol Wax GmbH, Witternstraße Werk Witternstraße	Witternstraße 7, 21107 Hamburg
Sasol Wax GmbH, Worthdamm Werk Worthdamm	Worthdamm 13-27, 20457 Hamburg
Shell Deutschland Oil GmbH Raffinerie Heide	Postfach 14 40, 25734 Hemmingstedt
Shell Deutschland Oil GmbH Rheinland Raffinerie Werk Godorf	Godorfer Hauptstr. 150, 50997 Köln

Raffinerien	Anschrift
Shell Deutschland Oil GmbH Rheinland Raffinerie Werk Wesseling	Ludwigshafener Str. 1, 50389 Wesseling
Shell Deutschland Oil GmbH Terminal Hamburg Harburg	Kattwykdamm 5, 21107 Hamburg
TOTAL Bitumen Deutschland GmbH	Ostermoor, 25541 Brunsbüttel
TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH (Raffinerie/POX)	Maienweg 1, 06237 Spergau

B Anhang – Experten*Expertinnenkonsultation

Tabelle 39: Konsultierte Institutionen

Institution	Branche	Zeitraum Austausch
BAFA	Verwaltung/Behörde	März-Mai 2024
BP Europa SE – Werk Emsland	Raffinerie	März 2023
Buchen Umweltservice	Reinigungsbetrieb	März 2023
CONCAWE	Verband	September-Dezember 2023
Destatis	Behörde	Mai-Oktober 2023
FILTRATEC	Fackelbetrieb	März 2023
PCK Raffinerie GmbH – Werk Schwedt	Raffinerie	März 2023
Shell Deutschland Oil GmbH – Werk Godorf	Raffinerie	März 2023
Shell Deutschland Oil GmbH – Werk Wesseling	Raffinerie	März 2023
HTR Hamburger Tankreinigung und Containerwartung GmbH	Reinigungsbetrieb	Februar 2023
SIS GmbH	Fackelbetrieb	März 2023
TÜV Nord	Dienstleister	Juni-Juli 2023
W.T.R.	Reinigungsbetrieb	März 2023
COTAC Group	Reinigung	April 2023
Open Grid Europe	Verband	Juni 2023
DB Cargo	Logistik	April/Mai 2023
Verband Tankwageninnenreinigung	Verband/ Reinigung	März-Mai 2023
HGK Shipping	Spedition	Juni 2023
CONCAWE	Verband	November/Dezember 2023
Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt e.V. (BDB)	Verband	Juni 2023
Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV)	Verwaltung	Juni 2023

C Anhang – Angaben in Emissionserklärungen zu Tanklagerreinigungen

Die Emissionserklärungen sind nicht Teil des öffentlichen Berichts.

D Zeitreihen - Entwicklungen mit Emissionsrelevanz

D.1 Raffinerietanklager und raffinerieferne Tanklager

Tabelle 40: Anteil der Reinigung von Raffinerietanks und raffineriefernem Lagertanks mit Abfackeln

Jahr	Anteil Abfackeln in Prozent
2021	50
2020	50
2019	50
2018	50
2017	50
2016	50
2015	50
2014	50
2013	50
2012	50
2011	51
2010	52
2009	53
2008	55
2007	56
2006	57
2005	58
2004	59
2003	60
2002	61
2001	63
2000	64
1999	65
1998	66
1997	67
1996	68
1995	69
1994	70

Jahr	Anteil Abfackeln in Prozent
1993	72
1992	73
1991	74
1990	75

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Annahmen und Quellen.

Tabelle 41: Reinigungsintervalle von Raffinerietanks und raffineriefernen Lagertanks

Jahr	Rohöl [Jahre]	Halb- u. Fertigprodukte [Jahre]	Sonstige Tankläger [Jahre]
2021	7	10	10
2020	7	10	10
2019	7	10	10
2018	7	10	10
2017	7	10	10
2016	7	10	10
2015	7	10	10
2014	7	10	10
2013	7	10	10
2012	7	10	10
2011	6,9	9,9	9,9
2010	6,8	9,8	9,8
2009	6,7	9,7	9,7
2008	6,6	9,6	9,6
2007	6,5	9,5	9,5
2006	6,5	9,5	9,5
2005	6,4	9,4	9,4
2004	6,3	9,3	9,3
2003	6,2	9,2	9,2
2002	6,1	9,1	9,1
2001	6,0	9,0	9,0
2000	5,9	8,9	8,9
1999	5,8	8,8	8,8
1998	5,7	8,7	8,7
1997	5,6	8,6	8,6

Jahr	Rohöl [Jahre]	Halb- u. Fertigprodukte [Jahre]	Sonstige Tanklager [Jahre]
1996	5,5	8,5	8,5
1995	5,5	8,5	8,5
1994	5,4	8,4	8,4
1993	5,3	8,3	8,3
1992	5,2	8,2	8,2
1991	5,1	8,1	8,1
1990	5	8	8

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Annahmen und Quellen.

Tabelle 42: Aus Reinigungsintervall, Anteil Fackelanschluss, Emissionen pro Reinigung resultierender kombinierter Emissionsfaktor

Jahr	Rohöllagertanks - Berechnungsansatz 1 [kg/m ³]	Tanks für Halb- und Fertigprodukte, sonstige Tanklager, Lager bei sonstigen Mineralölverarbeitern - Berechnungsansatz 1 [kg/m ³]	Rohöllagertanks - Berechnungsansatz 2 [kg/m ³]	Tanks für Halb- und Fertigprodukte, sonstige Tanklager, Lager bei sonstigen Mineralölverarbeitern - Berechnungsansatz 2 [kg/m ³]
2021	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2020	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2019	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2018	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2017	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2016	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2015	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2014	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2013	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2012	0,0036	0,0025	0,00179	0,00126
2011	0,0036	0,0025	0,00186	0,00130
2010	0,0037	0,0025	0,00193	0,00134
2009	0,0037	0,0026	0,00199	0,00138
2008	0,0038	0,0026	0,00207	0,00142
2007	0,0038	0,0026	0,00214	0,00147
2006	0,0039	0,0026	0,00221	0,00151
2005	0,0039	0,0027	0,00229	0,00156

Jahr	Rohöllagertanks - Berechnungsansatz 1 [kg/m³]	Tanks für Halb- und Fertigprodukte, sonstige Tankläger, Lager bei sonstigen Mineralölverarbeitern - Berechnungsansatz 1 [kg/m³]	Rohöllagertanks - Berechnungsansatz 2 [kg/m³]	Tanks für Halb- und Fertigprodukte, sonstige Tankläger, Lager bei sonstigen Mineralölverarbeitern - Berechnungsansatz 2 [kg/m³]
2004	0,0040	0,0027	0,00237	0,00160
2003	0,0040	0,0027	0,00245	0,00165
2002	0,0041	0,0028	0,00253	0,00170
2001	0,0042	0,0028	0,00262	0,00174
2000	-	-	-	-
1999	0,0043	0,0028	0,00280	0,00185
1998	0,0044	0,0029	0,00289	0,00190
1997	0,0044	0,0029	0,00299	0,00195
1996	0,0045	0,0029	0,00309	0,00200
1995	0,0046	0,0030	0,00319	0,00206
1994	0,0047	0,0030	0,00330	0,00212
1993	0,0047	0,0030	0,00341	0,00217
1992	-	-	-	-
1991	0,0049	0,0031	0,00365	0,00229
1990	0,0050	0,0031	0,00377	0,00236

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Annahmen und Quellen.

D.2 Tankmotorschiffe

Tabelle 43: Zeitreihen der Emissionsfaktoren für die Ventilierung von Tankmotorschiffen in Abhängigkeit von der Kapazitätsentwicklung

Jahr	Emissionsfaktor Min [kg/ Vorgang]	Emissionsfaktor Max [kg/ Vorgang]	Emissionsfaktor Mittel [kg/ Vorgang]
2021	1.302	2.524	1.913
2020	1.266	2.454	1.860
2019	1.244	2.413	1.828
2018	1.224	2.374	1.799
2017	1.297	2.515	1.906
2016	1.287	2.496	1.891
2015	1.298	2.517	1.908

Jahr	Emissionsfaktor Min [kg/ Vorgang]	Emissionsfaktor Max [kg/ Vorgang]	Emissionsfaktor Mittel [kg/ Vorgang]
2014	1.296	2.513	1.905
2013	1.278	2.479	1.879
2012	1.253	2.429	1.841
2011	1.247	2.418	1.833
2010	1.236	2.396	1.816
2009	1.212	2.350	1.781
2008	1.172	2.273	1.723
2007	1.155	2.240	1.698
2006	1.128	2.187	1.657
2005	1.116	2.165	1.641
2004	1.065	2.064	1.565
2003	1.046	2.028	1.537
2002	1.018	1.974	1.496
2001	1.002	1.944	1.473
2000	997	1.934	1.466
1999	993	1.926	1.459
1998	976	1.892	1.434
1997	981	1.903	1.442
1996	967	1.875	1.421
1995	953	1.848	1.400
1994	939	1.820	1.379
1993	936	1.815	1.375
1992	938	1.819	1.378
1991	940	1.822	1.381
1990	929	1.801	1.365

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Annahmen und Quellen.

D.3 Kesselwagen

Tabelle 44: Zeitreihe der Emissionsfaktoren für die Reinigung von Kesselwagen

Jahr	Emissionsfaktor [kg/Kesselwagenreinigung]
2021	15,7
2020	15,6
2019	15,6
2018	15,6
2017	15,5
2016	15,5
2015	15,4
2014	15,4
2013	15,4
2012	15,3
2011	15,3
2010	15,3
2009	15,2
2008	15,2
2007	15,1
2006	15,1
2005	15,1
2004	15,0
2003	15,0
2002	15,0
2001	14,9
2000	14,9
1999	14,9
1998	14,8
1997	14,8
1996	14,7
1995	14,7
1994	14,7
1993	14,6

Jahr	Emissionsfaktor [kg/Kesselwagenreinigung]
1992	14,6
1991	14,6
1990	14,5

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Annahmen und Quellen.

D.4 Tankwagen

Tabelle 45: Aus Reinigungsverfahren und Emissionen pro Reinigung resultierender kombinierter Emissionsfaktor

Jahr	EF bei Anteil unter Druck 0,05 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,1 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,3 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,5 [kg/Reinigung]
2020	3,47	3,30	2,59	1,88
2019	3,47	3,30	2,59	1,88
2018	3,47	3,30	2,59	1,88
2017	3,47	3,30	2,59	1,88
2016	3,47	3,30	2,59	1,88
2015	3,47	3,30	2,59	1,88
2014	3,47	3,30	2,59	1,88
2013	3,47	3,30	2,59	1,88
2012	3,47	3,30	2,59	1,88
2011	3,47	3,30	2,59	1,88
2010	3,47	3,30	2,59	1,88
2009	3,47	3,30	2,59	1,88
2008	3,47	3,30	2,59	1,88
2007	3,47	3,30	2,59	1,88
2006	3,47	3,30	2,59	1,88
2005	3,47	3,30	2,59	1,88
2004	3,47	3,30	2,59	1,88
2003	3,47	3,30	2,59	1,88
2002	3,47	3,30	2,59	1,88
2001	3,47	3,30	2,59	1,88

Jahr	EF bei Anteil unter Druck 0,05 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,1 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,3 [kg/Reinigung]	EF bei Anteil unter Druck 0,5 [kg/Reinigung]
2000	3,47	3,30	2,59	1,88
1999	3,47	3,30	2,59	1,88
1998	3,47	3,30	2,59	1,88
1997	3,47	3,30	2,59	1,88
1996	3,47	3,30	2,59	1,88
1995	3,47	3,30	2,59	1,88
1994	3,47	3,30	2,59	1,88
1993	3,47	3,30	2,59	1,88
1992	3,47	3,30	2,59	1,88
1991	3,47	3,30	2,59	1,88
1990	3,47	3,30	2,59	1,88

Quelle: Ökopol, erstellt anhand der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Annahmen und Quellen.