



ABSCHLUSSBERICHT

Bestellnr. 4500028343

Wissenschaftliche Beratung zur Aktualisierung der CO₂-Bilanz der LINEG

Abschlussbericht

Im Auftrag der



Projektbearbeitung

Institution

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
Kackertstraße 15-17
52056 Aachen

Bearbeiter

Wolfram Schröder, M. Sc.
Dr.-Ing. Kristoffer Ooms

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Projekthintergrund.....	5
3	Methodik.....	6
3.1	Methodik	6
3.1.1	Allgemeines Vorgehen bei einer Carbon-Footprint-Bilanzierung.....	6
3.1.2	Top-Down- und Bottom-Up-Bilanz	9
4	Aktualisierung der CO₂ Bilanz der LINEG.....	11
4.1	Prüfung der direkten und indirekten Emissionsfaktoren auf Aktualität	11
4.1.1	Direkte Emissionswerte	11
4.1.2	Indirekte Emissionswerte.....	12
4.1.3	Emissionsfaktoren	12
4.2	Prüfung der Bilanzgrenzen.....	14
4.3	Aktualisierung der CO ₂ -Bilanz auf Verbandsebene	14
4.3.1	Berechnung der CO ₂ -Bilanz für das aktuelle Bezugsjahr 2018	15
4.3.2	Änderungen zum Bezugsjahr 2010	15
4.4	Aktualisierung der CO ₂ -Bilanz für die KA Kamp-Lintfort.....	17
4.4.1	Berechnung der CO ₂ -Bilanz für das aktuelle Bezugsjahr 2018	17
4.4.2	Änderungen zum Bezugsjahr 2010	19
5	Literaturverzeichnis	21

Verzeichnis der Bilder

Abbildung 3-1:	Entstehungsorte direkter und indirekter Emissionen (Pinnekamp <i>et al.</i> , 2011).....	7
Abbildung 3-2:	Zuordnung der Emissionsarten bei den jeweiligen Unterprozessen	7
Abbildung 3-3:	Bilanzierungsmodelle für die Ermittlung des Carbon Footprint	9
Abbildung 4-1:	Direkte CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen der einzelnen Einheiten einer Beispiel Abwasserreinigungsprozesskette (Parravicini, Svardal, & Krampe, 2016).12	

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1:	Emissionsfaktoren der Bezugsjahre 2018 und 2010 sowie deren Differenz	13
Tabelle 4-2:	Vergleich der THG-Emissionen aus den Bezugsjahren 2010 und 2018	16
Tabelle 4-3:	Bottom-Up-CO ₂ -Bilanz der Kläranlage Kamp-Lintfort (Bezugsjahr 2018) ..	18
Tabelle 4-4:	Bottom-Up-CO ₂ -Bilanz der Kläranlage Kamp-Lintfort (Bezugsjahr 2010) und Differenzen zwischen 2010 und 2018	20

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Einheit
BHKW	Blockheizkraftwerk	-
CF	Carbon Footprint	-
CO _{2,eq}	CO ₂ -Äquivalente	
EF	Emissionsfaktor	-
EW	Einwohnerwert bezogen auf den CSB	E
GWP	Global Warming Potential	-
j	Index zur Unterscheidung von Einzelprozessen	-
KA	Kläranlage	-
THG	Treibhausgas	-
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	
TS	Trockensubstanz	

1 Einleitung

Die globale Erwärmung und der Treibhauseffekt gelten als die wichtigsten Umweltprobleme und Herausforderungen der heutigen Zeit (Yapıcıoğlu & Demir, 2019; Sweetapple, Fu, & Butler, 2014). Um diese Auswirkungen zukünftig abschwächen zu können, haben sich die Länder im Rahmen des Kyoto-Protokolls zu Emissionsreduktionszielen verpflichtet (United Nations, 1998; UNFCCC-Submission, 2021). Somit steigt der Fokus auf die Entwicklung von Strategien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen (THG). Der Abwassersektor gilt dabei als eine wichtige Quelle für THG-Emissionen (Sweetapple, Fu, & Butler, 2014). Er war 2005 mit rund 476 700 000 t CO_{2,eq}/a für über 5 % der weltweiten Nicht-CO₂-THG-Emissionen verantwortlich, und es wird prognostiziert, dass diese Emissionen bis 2030 um 27 % auf rund 608 800 000 t CO_{2,eq}/a steigen werden (U.S. EPA, 2012). Die Abwasserbehandlung in Kläranlagen (KA) führt zu einer Bildung und direkten Emission der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Indirekte Treibhausgasemissionen entstehen beispielsweise durch die genutzte Energie und durch den An- und Abtransport von Materialien (Sweetapple, Fu, & Butler, 2014).

Bei der Abwasserbehandlung entstehen hauptsächlich im Zusammenhang mit den aeroben und anaeroben biologischen Prozessen Emissionen. CO₂ wird dabei als Folge des aeroben und anaeroben biologischen Abbaus organischer und anorganischer Substanzen emittiert, bspw. bei der mikrobiellen Atmung. Die Mechanismen der CH₄- und CO₂-Produktion variieren aufgrund von Kläranlagencharakteristika (Yapıcıoğlu & Demir, 2019). Neben diesen beiden wichtigen Treibhausgasen, verstärkt sich der Fokus auf Lachgas, welches während der biologischen Prozesse (Nitrifikation und Denitrifikation) gebildet wird. Der Abwassersektor ist für fast 3 % der gesamten anthropogenen N₂O-Emissionen verantwortlich (Office of Research and Development, 2013; Pachauri & Reisinger, 2007). Als Hauptverursacher der N₂O-Bildung wurde die Aktivität der Ammoniak oxidierenden Bakterien (AOB) während der Nitrifikation in mehreren Studien identifiziert, wenn auch die Mechanismen bis heute nicht vollständig erforscht sind (Mannina, Cosenza, & Ekama, Greenhouse gases from membrane bioreactors: Mathematical modelling, sensitivity and uncertainty analysis, 2017).

Studien zeigen, dass die Menge und Verteilung der produzierten THG von den Eigenschaften des Eingangstroms des Abwassers, den Abwassernormen, den verwendeten Abwasser- und Schlammbehandlungsprozessen und den Betriebsbedingungen abhängen. Dementsprechend ist es notwendig, dem Anlagendesign und -betrieb große Aufmerksamkeit zu schenken, um die THG-Produktion zu minimieren (Yapıcıoğlu & Demir, 2019). Ein angepasster Betrieb von Abwasseraufbereitungsprozessen kann eine bedeutende Rolle bei der Reduzierung von THG-Emissionen spielen (Gori, Jiang, Sobhani, & Rosso, 2011). Mit der Hilfe von mathematischen Prozessmodellen können zum Beispiel die Reduzierungsansätze der Treibhausgase untersucht und Ursachen mittels Sensitivitätsanalysen auf ihre Relevanz analysiert werden.

Um signifikante Reduktions- und Minderungsstrategien ergreifen zu können ist es jedoch zunächst wichtig die aktuellen THG-Emissionen der KA und weiterer beteiligter Prozesse zu analysieren (Yapıcıoğlu & Demir, 2019; Mannina, Capodici, Cosenza, Di Trapani, & Ekama, 2020).

2 Projekthintergrund

Die Klimapolitik steht vor der Herausforderung, dass die Treibhausgasemissionen (THG) der Industrieländer um 98 % reduziert werden müssen, um eine als gefährlich angesehene globale Temperaturerhöhung von über 2 °Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu vermeiden. Der Europäische Rat hat diesem Ziel im Oktober 2009 mit dem Vertrag von Lissabon politische Rückendeckung verliehen.

Die Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft der Wasserwirtschaftsverbände in Nordrhein-Westfalen (agw) haben sich dieser Aufgabe im Bereich der Wasserwirtschaft im Jahr 2014 gestellt und somit der Herausforderung, neue emissionsärmere Anlagen, Prozesse und Betriebsweisen zu finden. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Treibhausgasemissionen der Produkte und Prozesse bekannt sind. Eine CO₂-Bilanz kann die diesbezügliche Klimaverträglichkeit transparent machen und als Grundlage dienen, Minderungspotentiale aufzuzeigen und zu erschließen.

Für Prozesse und Anlagen in der Wasserwirtschaft wurden bisher in Deutschland nur vereinzelt CO₂-Bilanzen erstellt, bei denen es sich entweder um vorläufige Hochrechnungen oder um Einzelfälle handelt, die kaum mit anderen Anlagen vergleichbar sind. Daher wurde in Phase I des Vorprojektes gemeinsam mit neun Verbänden der agw eine Methodik zur einheitlichen Bewertung wasserwirtschaftlicher Tätigkeitsfelder entwickelt und diese in Phase II für die Anforderungen in der Praxis validiert.

Die linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft (LINEG) war sowohl in Phase I als auch Phase II Partner in dem Projekt und hat eine Top-Down-CO₂-Bilanz für den gesamten Verband und Detailbilanzen für ausgewählte Anlagen erstellt. Diese CO₂-Bilanzen möchte die LINEG sowohl für den Verband als auch für die Kläranlage Kamp-Lintfort aktualisieren, um die Entwicklung der letzten Jahre zu dokumentieren.

Vor diesem Hintergrund forderte die LINEG daher das FiW auf, eine Aktualisierung der CO₂-Bilanzen vorzunehmen.

Die in diesem Vorhaben angewendete Bilanzierungssystematik basiert sowohl auf internationalen Standards als auch auf einheitlichen branchenspezifischen Festlegungen. Dazu gehören klar definierte Systemgrenzen und zugehörige Prozesse genauso wie einheitliche und nachvollziehbare Bilanzierungsregeln und Berechnungen. Die Bilanzierungssystematik und die Details der Datenerhebung wurden im Vorprojekt mit den beteiligten Verbänden detailliert abgestimmt und entsprechend der Datenverfügbarkeit angepasst.

3 Methodik

3.1 Methodik

3.1.1 Allgemeines Vorgehen bei einer Carbon-Footprint-Bilanzierung

Im Fokus der Carbon-Footprint-(CF)-Bilanzierung steht die Ermittlung und Bewertung der Klimarelevanz der Wasserwirtschaft. Andere Umweltwirkungen, wie Ressourcenverbrauch und Flächennutzung, die im Rahmen einer vollständigen Ökobilanz ermittelt werden müssen, bleiben unberücksichtigt.

Die Bilanzierung erfolgte entsprechend der ISO-Normen 14040 ff. zur Ökobilanzierung in 4 Phasen:

- Festlegung des Untersuchungsrahmens, Definition der Systemgrenzen
- Erfassung aller relevanten Prozesse im Bilanzraum
- Datenerhebung für alle In- und Outputströme
- Berechnung der Treibhausgas (THG) - Emissionen, Abschätzung der Klimawirkung

Allgemein wird bei der Bilanzierung des CF zwischen zwei Emissionsarten unterschieden. Als **indirekt** werden **Emissionen** bezeichnet, die bei den Herstellungsprozessen der verwendeten Rohstoffe bzw. Materialien und bei der Erzeugung der benötigten Energie entstehen; hierzu zählen auch die Emissionen bei der Verbrennung von Kraftstoffen in Fahrzeugen (siehe Abbildung 3-1, Abbildung 3-2). Auf der Kläranlage entstehen diese Emissionen in Form von $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ in erster Linie bei dem Verbrauch von Hilfsstoffen und Materialien, welche für den Prozess benötigt werden. Der Einsatz dieser Stoffe auf der Kläranlage verursacht in vielen Fällen keine Treibhausgase unmittelbar vor Ort. Herstellungsprozess und Transport hingegen verursachen relevante Treibhausgasemissionen und werden in der CF-Bilanz berücksichtigt. Zu diesen Betriebsmitteln zählen insbesondere Chemikalien zur Fällung oder Flockung von Abwasserinhaltsstoffen sowie zur Regulierung des pH-Wertes. Die Bilanzierung dieser indirekten Emissionen ist sehr konkret möglich, da die bezogenen Stoff- und Energieströme aus betriebswirtschaftlichen Gründen genau erfasst werden und somit eindeutig bewertet werden können.

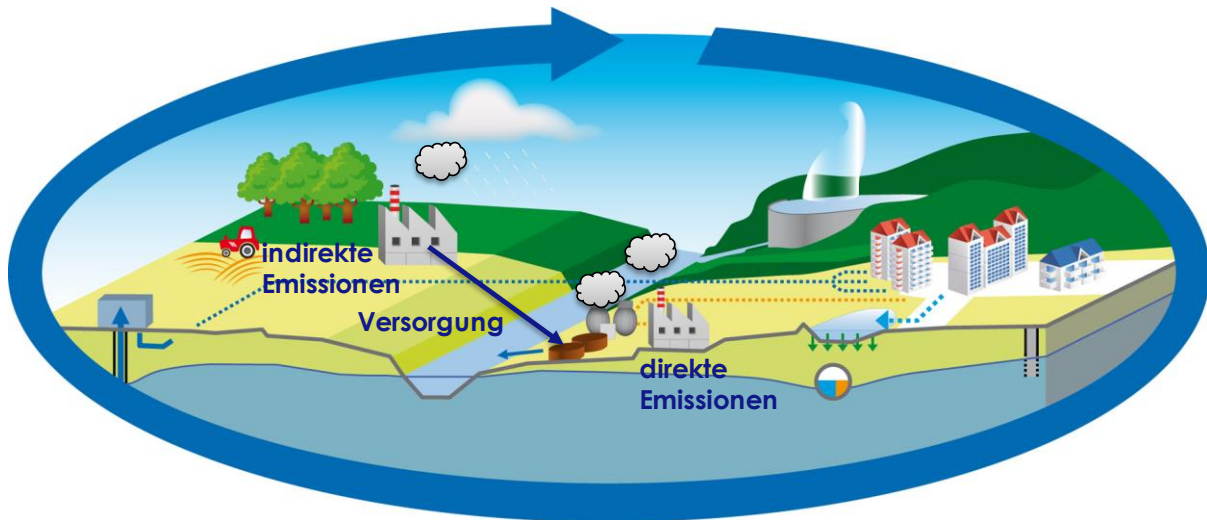


Abbildung 3-1: Entstehungsorte direkter und indirekter Emissionen (Pinnekamp et al., 2011)

Direkte Emissionen bezeichnen Treibhausgasemissionen, welche unmittelbar im Bilanzierungsraum an die Atmosphäre abgegeben werden. In der Wasserwirtschaft handelt es sich hier insbesondere um die Gase CH_4 und N_2O . Bei der Abwasserreinigung bzw. konkret bei der Kohlenstoffelimination wird jedoch auch CO_2 freigesetzt. Da dieses CO_2 nicht fossilen Ursprungs ist, wird es im CF des Wasserkreislaufes nicht berücksichtigt. Die Emissionen von CH_4 und N_2O , welche ebenfalls auf der Kläranlage gebildet werden, haben jedoch auf Grund des global warming potentials (GWP) einen direkten Effekt auf den Treibhauseffekt. Direkte Emissionen sind stark prozess- und milieuabhängig und daher ohne konkrete Messungen nur näherungsweise abschätzbar.

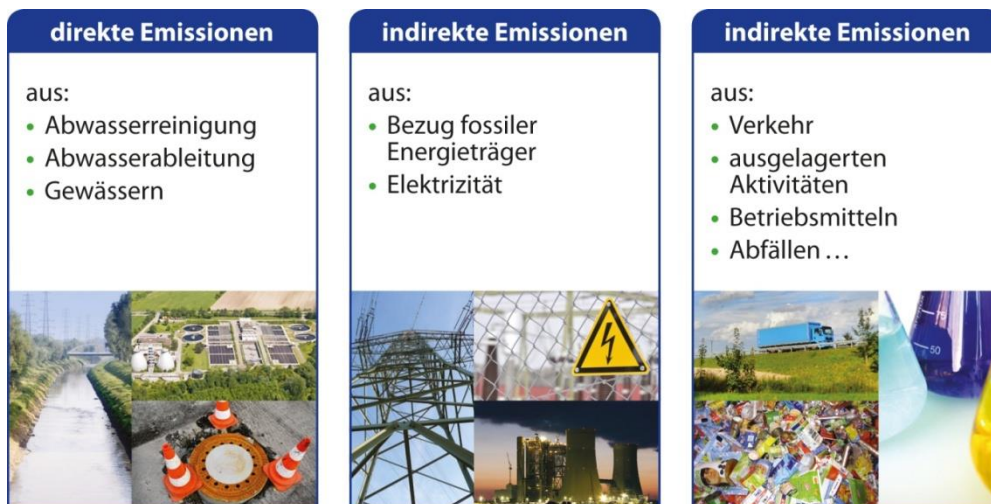


Abbildung 3-2: Zuordnung der Emissionsarten bei den jeweiligen Unterprozessen

Wurden die zu betrachtenden Prozesse innerhalb des Bilanzraumes festgelegt, sind für diese Verbrauchsmengen zu erheben (siehe Abbildung 3-2), anhand derer sämtliche Emissionsquellen und ggf. auch -senken identifiziert werden können. Dazu gehören neben den Hauptprozessen (z. B. Abwasserreinigungsstufen) auch vor- und nachgelagerte Prozesse (Herstellung bzw. Erzeugung von Materialien und Energie, Transporte, Entsorgung) sowie die Betriebsgebäude.

Die indirekten Emissionen sowie CH₄ und N₂O werden einheitlich auf CO_{2,eq}-Emissionen umgerechnet. Mit sogenannten Emissionsfaktoren (EF) werden die in Gl. (3-1) genannten Aktivitätsdaten (Mengen) in resultierende THG-Emissionen überführt:

$$CF = \sum_{i=0}^n \text{Energie}_i \cdot EF_i + \sum_{i=0}^n \text{Stoff}_i \cdot EF_i + \sum_{i=0}^n \text{THG}_i \cdot GWP_i \quad \text{Gl. (3-1)}$$

Der EF gibt an, welche Menge an CO_{2,eq} pro eingesetzter Menge eines Stoffes, eines Produktes oder Energieeinheit emittiert wird. Die Summe der THG-Emissionen wird ausgedrückt als CO_{2,eq} relativ zu einer Aktivitätseinheit (z. B. CO_{2,eq} pro m³ Abwasser). Die EF sind mittlerweile für viele Produkte und Prozesse in öffentlich zugänglichen Datenbanken (z. B. (GEMIS, 2017)), teilweise in Herstellerinformationen oder in anderen Publikationen (z. B. (Hoffman, 2014)) zu finden. Insbesondere für vor- und nachgelagerte Prozesse (Vorketten, Transporte, Entsorgung) reicht es aus, solche Werte zu verwenden. Für alle direkten Emissionen sind nach Möglichkeit eigene Werte zu ermitteln (International Organisation for Standardisation (IOS), 2018).

Äußerst wichtig für die CF-Bilanzierung ist eine klare Festlegung des Bilanzraumes mit den relevanten Prozessen. Dies ist häufig sehr schwierig, aber für einen aussagekräftigen CF, der mit zukünftigen Werten sowie mit anderen Anlagen verglichen werden kann, unerlässlich. Dieser Arbeitsschritt sollte deshalb sehr sorgfältig durchgeführt werden.

Inwieweit alle indirekten Emissionen aus den Vorketten der eingesetzten Produkte und Materialien sowie der nachgelagerten und begleitenden Prozesse (z. B. Abfallentsorgung, Geschäftsreisen) berücksichtigt werden müssen, hängt davon ab, welchen Einfluss sie auf das Ergebnis haben. Ist der Beitrag zum Gesamt-CF nur sehr gering, der Aufwand zur Ermittlung der Emissionen dagegen hoch, dürfen diese auch vernachlässigt werden. Es ist genau zu dokumentieren, welche Anteile am CF nicht enthalten sind und aus welchem Grund (International Organisation for Standardisation (IOS), 2018). CO₂-Emissionen aus fossilen und biogenen Quellen sind in einer CF-Bilanz getrennt auszuweisen. Eine Auflistung aller in diesem Bericht verwendeten Emissionsfaktoren ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.

3.1.2 Top-Down- und Bottom-Up-Bilanz

Grundsätzlich wurden für die CF-Bilanzierung zwei Ansätze parallel verfolgt. Der Top-Down-Ansatz, der die gesamte Verbandseinheit betrachtet, und der Bottom-Up-Ansatz, der Teilprozesse anlagenspezifisch erfasst und abbildet. Die beiden Vorgehensweisen sowie die benötigten Eingangswerte werden in Abbildung 3-3 dargestellt.

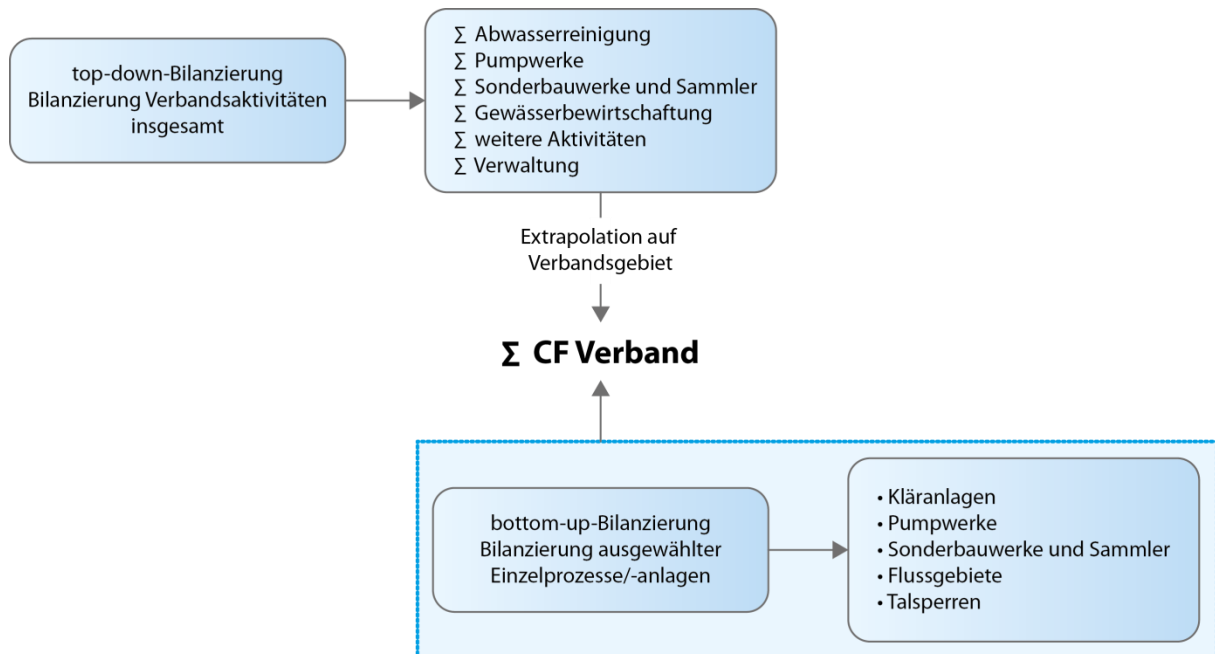


Abbildung 3-3: Bilanzierungsmodelle für die Ermittlung des Carbon Footprint

3.1.2.1 Top-Down-Ansatz:

Mit dem Top-Down-Ansatz wurde der Carbon Footprint für den gesamten Verband berechnet, also inklusive Verwaltung, Transporte, Dienstreisen etc. Der Ansatz hat den Vorteil, dass er einfach handhabbar und mit vorhandenen Daten zügig umsetzbar ist. Allerdings ist er für einzelne Anlagen und Prozessanalysen wenig aussagekräftig.

Mit dem Top-Down-Ansatz werden die Verbandsaktivitäten der einzelnen Aufgabenfelder (Kläranlagen, Pump- und Sonderbauwerke, Gewässer- und Talsperrenbewirtschaftung etc.) für einen definierten Erhebungszeitraum z. B. von einem Jahr in Summe betrachtet und bilanziert. Hieraus können insbesondere auch Handlungsfelder für die detaillierte Analyse aufgezeigt werden.

Weiterhin lassen sich für einzelne Teilgebiete spezifische Kenngrößen des Gesamtverbandes ableiten. Der CF von Kläranlagen lässt sich über die spezifische Einheit $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}$ pro Einwohner (EW) und Jahr (a) quantifizieren. Pumpwerke hingegen können mit der spezifischen Einheit $\text{g CO}_{2,\text{eq}}$ pro m^3 Fördervolumen und m verlustbehafteter Förderhöhe klassifiziert werden. Mittels dieser Referenzierung erfolgt eine erste Abschätzung der $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ -Emissionen einzelner Tätigkeitsfelder genauso wie die Abschätzung des CF für den Gesamtverband. Ein direkter Vergleich dieser spezifischen Werte muss jedoch immer unter

Berücksichtigung der lokalen Rahmenbedingungen erfolgen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. So weist z. B. ein schwach besiedeltes Gebiet mit langen Transportwegen und einer Prägung durch kleine und mittlere Kläranlagen deutlich andere Gegebenheiten auf als ein dicht besiedeltes Gebiet mit wenigen großen Kläranlagen.

3.1.2.2 Bottom-Up-Ansatz:

Mit dem Bottom-Up-Ansatz werden die Emissionen anlagenspezifisch auf Teilprozessebene erfasst. Dieses Modell erreicht eine sehr viel höhere Detailtiefe als eine Verbandsbetrachtung und ermöglicht einen gezielten Eingriff in den Betrieb, um den CF zu reduzieren und kann anschließend auf das gesamte Verbandsgebiet extrapoliert werden.

4 Aktualisierung der CO₂ Bilanz der LINEG

4.1 Prüfung der direkten und indirekten Emissionsfaktoren auf Aktualität

Die ursprünglich verwendete Methodik zur Berechnung der direkten und indirekten Emissionen im Vorläuferprojekt wird im folgenden Abschnitt auf Aktualität geprüft und die Anpassungen an die Berechnung für das Bezugsjahr 2018 dargestellt. Eine umfassende Literaturrecherche bezüglich der anzulegenden direkten und indirekten Emissionsfaktoren gibt Aufschluss über Änderungen, die aufgrund neuer Datengrundlagen oder Berechnungen entstehen können. Der Vergleich soll Änderungen verdeutlichen, die eine potentielle Ursache für Differenzen zwischen den Ergebnissen der Bezugsjahre 2018 und 2010 (siehe Kapitel 4.3 und 4.4) darstellen können.

4.1.1 Direkte Emissionswerte

Im Vorläuferprojekt wurde mit dem Top-Down-Ansatz eine CO₂-Bilanz der Verbandsebene der LINEG erstellt. Zu diesem Zwecke wurden direkte Emissionen anhand von Betriebsdaten des Jahres 2010 berechnet. Dabei wurden die direkten CH₄-Emissionen der Abwasserreinigung, der Klärschlammfaulung (inklusive Eindickung und Methanschluß), der Faulgasverbrennung (inklusive Methanschluß) und der Klärschlammverbrennung berücksichtigt. Zusätzlich wurden die direkten N₂O-Emissionen der Abwasserreinigung, der Faulschlammverbrennung und der Faulgasverbrennung berechnet. Die Berechnungsansätze für die einzelnen Anlagenteile bezüglich der N₂O-Emissionen ergeben sich als eine Multiplikation der Massen- oder Volumenströme und der zugehörigen Emissionsfaktoren, gegebenenfalls ergänzt durch einen zusätzlichen Umrechnungsfaktor in CO₂-Äquivalente (Doorn, et al., 2006).

Direkte Emissionen entstehen innerhalb der Systemgrenzen. Dabei ist die Menge der emittierten Menge an CO₂-Äquivalenten stark von dem genutzten Abwasserreinigungsverfahren und den Betriebsbedingungen abhängig. Je nach Definition der Systemgrenzen werden die Emissionen, die durch Frachteinträge des Abflusstroms der Kläranlagen entstehen können, zu den direkten Emissionen gezählt oder entfallen. In der vorliegenden Betrachtung werden diese Emissionen nicht mit einbezogen.

Die direkten Emissionen der Abwasserreinigung setzen sich aus CO₂-, N₂O- und CH₄-Emissionen zusammen, wobei direkte CO₂-Emissionen in einer CO₂-Bilanz normalerweise nicht berücksichtigt werden, da sie zum Großteil biogen sind und somit annähernd klimaneutral (Parravicini, Svardal, & Krampe, Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants, 2016). Direkte N₂O-Emissionen entstehen hauptsächlich in der aeroben Abwasserreinigung (Law, Ye, Pan, & Yuan, 2015; Kampschreur, Temmink, Kleerebezem, Jettena, & van Loosdrecht, 2009) und direkte CH₄-Emissionen entlang der Schlammführung und -stabilisierung (Daelman, van Voorthuizen, van Dongen, Volcke, & van Loosdrecht, 2013).

Mögliche Verfahrenseinheiten, die direkte Emissionen produzieren, sind in Abbildung 4-1 anhand von einer Beispielfahrensketten dargestellt.

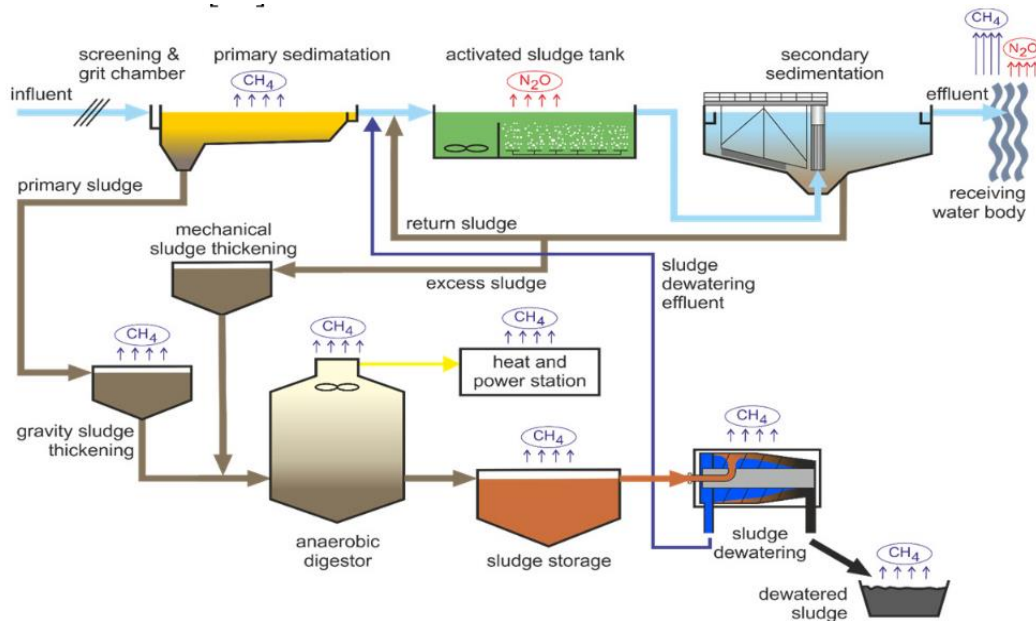


Abbildung 4-1: Direkte CH_4 - und N_2O -Emissionen der einzelnen Einheiten einer Beispiel Abwasserreinigungsprozesskette (Parravicini, Svoldal, & Krampe, Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants, 2016)

Dabei werden die direkten N_2O -Emissionen der Abwasserreinigung von den Abbauraten des Gesamtstickstoffs und der Zulaufbelastung der Belebtschlammbecken bei der Nitrifikation und Denitrifikation beeinflusst (Parravicini, et al., 2015).

CH_4 -Emissionen entstehen hauptsächlich bei der anaeroben Stabilisierung, durch Schlupf bei der Biogaslagerung oder bei der Verstromung im BHKW. Geringe Anteile werden im Belebtschlammbecken mit der Abluft abgezogen (Parravicini, Svoldal, & Krampe, Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants, 2016).

4.1.2 Indirekte Emissionswerte

Die Berechnung der indirekten Emissionen bleibt unverändert zu dem Vorläuferprojekt. Dabei werden die Treibhausgasemissionen als CO_2 -Äquivalente anhand von Energie- und Stoffeinsatz sowie den entsprechenden Emissionsfaktoren berechnet.

4.1.3 Emissionsfaktoren

In Tabelle 4-1 sind die Emissionsfaktoren, die in der aktuellen Bilanzierung verwendet werden, sowie die Emissionsfaktoren aus dem Vorgängerprojekt dargestellt. Zum Teil wurden die Emissionsfaktoren übernommen, da bei der Recherche keine neuen bzw. aktualisierten Faktoren gefunden wurden. Für die Berechnung einiger Emissionen waren Zusatzdaten wie bspw. der spezifische Brennwert zur Umrechnung der vorliegenden Daten notwendig. Diese werden hier nicht im Detail aufgeführt.

Tabelle 4-1: Emissionsfaktoren der Bezugsjahre 2018 und 2010 sowie deren Differenz

	Bezugsjahr 2018		Bezugsjahr 2010		Differenz (2018 - 2010)	
	t CO _{2,eq}	Quelle	t CO _{2,eq}	Quelle	t CO _{2,eq}	% (v. 2010)
Endenergiebereitstellung und Nutzung						
Strom (deutscher Mix) je kWh	4,68E-04	(UBA, 2020)	5,44E-04	(UBA, 2012)	-7,60E-05	-13,97
Erdgas je kWh			2,51E-04	(GEMIS, 2011)	nur einfach vorhanden	
Fernwärme-mix je kWh	2,61E-04	(GEMIS, 2017)	2,54E-04	(GEMIS, 2011)	7,08E-06	2,79
Benzin je Liter	2,74E-03	(GEMIS, 2017)	3,08E-03	(GEMIS, 2011)	-3,40E-04	-11,02
Diesel je Liter	3,06E-03	(GEMIS, 2017)	3,10E-03	(GEMIS, 2011)	-3,34E-05	-1,08
Propangas je Liter	5,40E-04	(GaBi, 2020b)			nur einfach vorhanden	
Flüssiggas je Liter			1,76E-03	(GEMIS, 2011)	nur einfach vorhanden	
Kraftstoff für 2 Takt-Motoren je kWh	3,95E-05	(GEMIS, 2011)	3,95E-05	(GEMIS, 2011)	keine Änderung	
LPG je kWh			2,50E-05	(GEMIS, 2011)	nur einfach vorhanden	
Klärgas-BHKW je kWh	5,80E-06	(GEMIS, 2011)	5,80E-06	(GEMIS, 2011)	keine Änderung	
Abfälle und Transporte						
Verbrennung Restsiedlungsabfall, Hausmüll je t	5,50E-04	(GaBi, 2020b)	3,73E-01	(UBA, 2008)	-3,72E-01	-99,85
Klärschlammverbrennung/Stützfeuerung	1,17E+00	(Thöle, 2011)	1,17E+00	(Thöle, 2011)	keine Änderung	
LKW (<7,5 t) je tkm	2,57E-05	(GaBi, 2020c) (Nutzlast < 2,7 t)	2,00E-04	(VDA, 2008)	-1,74E-04	-87,15
Sonstige						
Trinkwasser je m ³	1,15E-04	(GaBi, 2020a) (Trinkwassermix)	3,99E-04	(GEMIS, 2011)	-2,84E-04	-71,15
Betriebsmittel (je t)						
Polyelektrolyte (Flockungshilfsmittel) je t	2,62	(Hoffman, 2014)	1,15	(STOWA, 2010)	1,47E+00	127,83
FeCl ₃ je t	1,15	(STOWA, 2010)	1,15	(STOWA, 2010)	keine Änderung	
AlClSO ₄ je t	1,13	(STOWA, 2010)	1,13	(STOWA, 2010)	keine Änderung	
Konversionsfaktoren Treibhausgase						
CO ₂ je t	1	(UBA, 2021)	1	(IPCC, 2007)	keine Änderung	
CH ₄ je t	25	(UBA, 2021)	25	(IPCC, 2007)	keine Änderung	
N ₂ O je t	298	(UBA, 2021)	298	(IPCC, 2007)	keine Änderung	

Verschiedene Emissionsfaktoren werden nur in einem der beiden Bezugsjahre verwendet, da Prozesse abgeschafft bzw. verändert oder neu eingeführt wurden. Diese sind dann nur einfach vorhanden.

Zu erkennen ist zudem, dass in den meisten Fällen keine oder geringe Änderungen von unter 15 % vorliegen und dass die Emissionsfaktoren (mit Ausnahme der Polyelektrolyte) seit dem Bezugsjahr 2010 abgenommen haben. Hervorzuheben sind neben den Polyelektrolyten die Emissionsfaktoren für Abfälle und Transporte sowie Trinkwasser. Hier sind – mit Ausnahme der Klärschlammverbrennung – signifikante Veränderungen zu erkennen. Die Wahl der Bilanzgrenzen ist gerade in diesen Bereichen entscheidend für die Höhe der Emissionen bzw. der Emissionsfaktoren. Da die Verfügbarkeit von Daten im Vorläuferprojekt noch weniger gut gegeben war, wurden hier viele verschiedene Quellen genutzt, um die Emissionsfaktoren zu ermitteln. Im aktuellen Projekt wurde versucht, die Vielfalt der Datenquellen zu verringern, um Emissionsfaktoren mit möglichst gleichen Eingangsparametern zu nutzen. Da sich durch diese veränderten Datenquellen ggf. auch die zugrundeliegenden Bilanzgrenzen verschoben haben, ist die Vergleichbarkeit mit den Daten aus dem Vorgängerprojekt schwierig.

4.2 Prüfung der Bilanzgrenzen

Es wurde kein Änderungsbedarf der Bilanzgrenzen im Rahmen der Aktualisierung der CO₂-Bilanz identifiziert. Die definierten Bilanzgrenzen des Abschlussberichtes des ursprünglichen Carbon-Footprint-Projektes in 2013 findet im Weiteren auch in dieser Analyse Anwendung. Die Emissionen, die durch Frachteinträge des Abflusstroms der Entlastungsbauwerke durch die mikrobiologische Umsetzung in Gewässern entstehen, werden dementsprechend nicht in die Berechnungen einbezogen.

4.3 Aktualisierung der CO₂-Bilanz auf Verbandsebene

In diesem Arbeitspaket wird die Top-Down-CO₂-Bilanz auf Verbandsebene der LINEG aktualisiert. Im Vorläuferprojekt wurde eine CO₂-Analyse auf Verbandsebene für die Aufgabenfelder Kläranlagen, Gewässer- und Talsperrenbewirtschaftung sowie Pump- und Sonderbauwerke mit den zugehörigen Nebenprozessen (Verwaltung) für das Bezugsjahr 2010 durchgeführt. In der aktualisierten Version der CO₂-Bilanz wurden nun soweit verfügbar Daten des Bezugsjahres 2018 herangezogen.

Eine Aufschlüsselung der Beiträge einzelner Bauwerke oder Anlagen ist an dieser Stelle, aufgrund des fehlenden Detailgrades der Daten, nicht aufzuzeigen. Deswegen wurde für die Erstellung der CO₂-Bilanz der Top-Down-Ansatz gewählt. Dieser hat den Vorteil, dass die benötigten Daten meist einfach verfügbar und in ausreichendem Maße aufgezeichnet sind. Anhand dieser Bilanz lassen sich einzelne Felder ableiten, die einer genaueren Betrachtung bedürfen, um anhand dieser detaillierte Analysen der Einflussfaktoren durchführen zu können.

4.3.1 Berechnung der CO₂-Bilanz für das aktuelle Bezugsjahr 2018

Zur Bilanzierung des CF auf Verbandsebene wurden im Wesentlichen Daten zum Energie-, Betriebsmittel und Treibstoffverbrauch sowie zu den Abfallmengen und Entsorgungswegen für den gesamten Verband erfasst. Die Datenerhebung erfolgte unterteilt für die Aufgabenfelder: Kläranlagen, Pump- und Sonderbauwerke sowie Verwaltung. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, um die Vollständigkeit der Top-Down-Bilanz weitestgehend zu gewährleisten und diese transparenter zu machen, insbesondere vor dem Hintergrund einer Vergleichbarkeit bzw. einer Interpretierbarkeit der Ergebnisse.

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der Top-Down-Bilanzierung für die LINEG aus den Bezugsjahren 2010 und 2018 dargestellt. Die direkten THG-Emissionen auf den Kläranlagen werden hier zwar berücksichtigt, basieren jedoch auf Abschätzungen anhand einer Vielzahl von Untersuchungen an Kläranlagen weltweit. Eine pauschale Übertragung auf alle Kläranlagen ist aufgrund der Spannweite von Einflussgrößen fehlerbehaftet.

In den Daten ist zu erkennen, dass im Bezugsjahr 2018 der elektrische Energiebezug (37 %) und die direkten Emissionen der Kläranlagen (33 %) den mit Abstand größten Teil der Emissionen verursachen. Da bereits über die Hälfte des Energiebedarfs aus Eigenstromproduktion (mit deutlich geringeren Emissionen als der Netzbezug) erzeugt wird und keine Detailangaben zu den Abwasserbehandlungsprozessen vorliegen, ist hier kein besonderes Einsparpotenzial hervorzuheben.

4.3.2 Änderungen zum Bezugsjahr 2010

Im direkten Vergleich zwischen den Bezugsjahren 2010 und 2018 ist zu erkennen, dass der Gesamt- CO_{2,eq}-Fußabdruck der LINEG auf Verbandsebene um rund 17 % reduziert werden konnte (vgl. Tabelle 4-2). Die größten prozentualen Einsparungen konnten dabei für den Energiebezug aus dem deutschen Stromnetz (rund 39 % weniger im Vergleich zu 2010) erzielt werden.

Diese Einsparungen resultieren einerseits aus umgesetzten Energiesparmaßnahmen (bspw. optimierte Belüftungsanlagen oder ertüchtigte BHKW) auf den vier größten Kläranlagen (Mörs-Gerdt, Xanten-Lüttingen, Rheinberg und Kamp-Lintfort) und andererseits auf der Steigerung der Eigenstromerzeugung.

Lediglich im Bereich der direkten Emissionen ist eine Zunahme der CO_{2,eq}-Emissionen zu verzeichnen (um rund 15 % im Vergleich zu 2010).

Tabelle 4-2: Vergleich der THG-Emissionen aus den Bezugsjahren 2010 und 2018

Emissionsquelle/ Aufgabengebiet	Bezugsjahr 2018				Bezugsjahr 2010				Differenz 2018 - 2010	
	Menge	Einheit	THG-Emissionen		Menge	Einheit	THG-Emissionen		THG-Emissionen	
			t CO ₂ e/a	%			t CO ₂ e/a	%	t CO ₂ e/a	% (v. 2010)
Energie gesamt			13.238	37			21.689	50	-8.451	-39
elektrische Energie aus deutschem Netz			13.132	37			21.544	50	-8.412	-39
Kläranlagen	6.140.342	kWh/a	2.925		12.285.174	kWh/a	6.713			
Pumpwerke	20.938.760	kWh/a	9.799		26.279.746	kWh/a	14.359			
Sonderbauwerke	156.730	kWh/a	73		45.266	kWh/a	25			
Verwaltung	715.338	kWh/a	335		822.385	kWh/a	447			
Wärmeenergie			106	0,3			145	0,3	-39	-26,7
Kläranlagen	0	kWh/a	0		21.294	kWh/a	5			
Verwaltung	407.000	kWh/a	106		550.000	kWh/a	139			
Zentrallabor	0	kWh/a	0		216.398	kWh/a	0			
Betriebsmittel gesamt			3.003	8			3.547	8	-544	-15
Aufbereitungsstoffe			3.003	8,5			3.546	8,2	-543	-15
Kläranlage	2.613	t/a	3.003		3.091	t/a	3.546			
Trinkwasser			0,08	0,0			1,00	0,0	-0,91	-92
Verwaltung	722,0	m³/a	0,08		2500,0	m³/a	1,00			
Treibstoffe gesamt			509	1			493	1	17	3
Verwaltung	0	kg/a	0		1.774	kg/a	6			
	0	kg/a	0		1.905	kg/a	1			
	58.839	l/a	407		0	l/a	0			
	28.166	l/a	86		78.750	l/a	244			
	0	l/a	0		14.449	l/a	45			
Gewässer	4.979	l/a	15		60.000	l/a	186			
	0	l/a	0		4.000	l/a	12			
	1.680	l/a	0,59		250	l/a	0,09			
Abfallentsorgung gesamt			6.954	20			7.033	16	-79	-1
Verbrennung			6.954	20			7.033	16	-79	-1
Kläranlage	526	t/a	1		932	t/a	351			
	5.937	tTS/a	6.954		5.565	tTS/a	6.518			
Verwaltung	17	t/a	0,02		17	t/a	6,40			
Werkstatt	15,6	t/a	0,02		20,0	t/a	7,53			
Abfalllager	0	t/a	0,00		400	t/a	150,60			
Verwertung			0	0			10	0	-10	-100
Kläranlagen	442,8	t/a	0,23		653,5	t/a	2,61			
Verwaltung	42,1	t/a	0,02		41,0	t/a	0,16			
Werkstatt	76,1	t/a	0,04		76,0	t/a	0,30			
Abfalllager	0,0	t/a	0,00		2.500,0	t/a	10,00			
Direkte Emissionen gesamt			11.800	33			10.229	24	1.571	15
Kläranlage			11.800,50				10.229,36			
			35.506	100			42.992	100	-7.486	-17

4.4 Aktualisierung der CO₂-Bilanz für die KA Kamp-Lintfort

In diesem Arbeitspaket wird die Bottom-Up-CO₂-Bilanz der Kläranlage Kamp-Lintfort der LINEG aktualisiert. Im Vorläuferprojekt wurde eine CO₂-Analyse der Anlage auf Prozessebene für das Bezugsjahr 2010 durchgeführt. In der aktualisierten Version der CO₂-Bilanz wurden nun, wie auch bei der Top-Down-Analyse auf Verbandsebene, soweit verfügbar Daten des Bezugsjahres 2018 herangezogen.

4.4.1 Berechnung der CO₂-Bilanz für das aktuelle Bezugsjahr 2018

Es wird an dieser Stelle der Bottom-Up-Ansatz gewählt. Im Vergleich zu dem in der CO₂-Bilanz auf Verbandsebene gewählten Top-Down-Ansatz wird hier eine detailliertere CO₂-Bilanz der Kläranlage durchgeführt, die durch spezifischere Daten ermöglicht wird. Dabei werden wie zuvor beschrieben indirekte und direkte Emissionen einbezogen. Anders als beim Top-Down-Ansatz für mehrere Anlagen bzw. die gesamte Verbandsebene sind die Daten zu den direkten Emissionen bei der Bottom-Up-Analyse verlässlicher, da sie anhand von anlagenspezifischen Daten und Informationen berechnet werden können.

In Tabelle 4-3 sind die Berechnungsergebnisse für das Bezugsjahr 2018 aufgeführt. Der prozentual größte Anteil von CO_{2,eq}-Emissionen fällt auf der Kläranlage Kamp-Lintfort aus den direkten Emissionen (35 % der Gesamtemissionen) und hier im Bereich der Abwasserbehandlung (25 % der Gesamtemissionen) an. Kaum ins Gewicht fallen Betriebsmittel- und Treibstoffverbrauch mit 1 % bzw. unter 1 % der Gesamtemissionen.

Pro angeschlossenem Einwohnerwert (41 983 E) fallen pro Jahr 57,3 kg CO_{2,eq} an. In Deutschland fallen insgesamt pro Kopf 7 750 kg CO_{2,eq}/(E*a) an (IEA, 2021), die Emissionen der Kläranlage machen also rechnerisch rund 0,74 % der Emissionen der angeschlossenen Einwohner aus.

Tabelle 4-3: Bottom-Up-CO₂-Bilanz der Kläranlage Kamp-Lintfort (Bezugsjahr 2018)

Bezugsjahr 2018								
	Type	Beschreibung	Menge		Ein- heit	THG-Emissionen		
						t CO ₂ e/a	kgCO ₂ e /(E*a)	%
A	Energie							
1	Verbrauch elektrischer Energie	insgesamt	1.142.057		kWh/a	534,48	12,7	22%
	Bezug aus dem deutschen Stromnetz	gesamt	1.142.057		kWh/a	534,48		22%
2	Verbrauch Wärmeenergie	insgesamt				0,00	0,0	0%
	fossile Energieträger							0%
		Flüssiggas			kWh/a	0,00		0%
		Erdgas			kWh/a	0,00	0,00	0%
		Heizöl			m³/a	0,00	0,00	0%
B	Betriebsmittel							
1	Verbrauch von Betriebsmitteln	insgesamt				33,54	0,8	1%
	Fällmittel	Fe-III-Cl	191.790		kg/a	30,42	0,72	1%
		Poly-Al-Cl	64.160		kg/a	3,11	0,07	0%
C	Treibstoffe							
1	Treibstoffverbrauch	insgesamt				0,46	0,0	0%
	Diesel	Transport Rechengut	1.745		tkm/a	0,04	0,00	0%
		Transport Sandgut	796		tkm/a	0,02	0,00	0%
		Transport Klärschlamm	15.173		tkm/a	0,39	0,01	0%
D	Abfallentsorgung							
1	Abfallentsorgung	insgesamt				740,52	17,6	31%
	Verbrennung	Rechengut	58		t/a	0,03	0,00	0%
	Verbrennung	Klärschlamm	632		t/a	740,49	17,64	31%
	Verwertung	Sandgut	44		t/a	0,00	0,00	0%
E	Baustoffe							
1	Baustoff	insgesamt				260,88	6,2	11%
	Bauwerksabschätzung					260,88	6,2	11%
A	Direkte Emissionen							
1		CH4	CO2e	N2O	CO2e	834,86	19,9	35%
	Abwasserbehandlung	12,87 t/a	322 t/a	0,96 t/a	285 t/a	606,90	14,46	25%
	Eindicker	0,85 t/a	21 t/a		0 t/a	21,15	0,50	1%
	Faulbehälter	0,08 t/a	2 t/a		0 t/a	1,97	0,05	0%
	Schlammmentwässerung	0,19 t/a	5 t/a		0 t/a	4,74	0,11	0%
	Klärschlammverbrennung	0,48 t/a	12 t/a	0,63 t/a	187 t/a	198,53	4,73	8%
	Faulgasverbennung (BHKW)	0,06 t/a	2 t/a	0,00 t/a	0 t/a	1,56	0,04	0%
Σ	realer Carbon Footprint					2.404,74	57,3	100%

4.4.2 Änderungen zum Bezugsjahr 2010

Im Vergleich zwischen den Bezugsjahren 2010 und 2018 ist zu erkennen, dass der CO₂-Fußabdruck der Kläranlage Kamp-Lintfort bezogen auf 2010 um rund 9 % gesunken ist (vgl. Tabelle 4-4). Die prozentual größten Einsparungen entstanden bei Treibstoffverbrauch (-87 % bezogen auf 2010) und Verbrauch von elektrischer Energie aus dem Stromnetz (-36 % bezogen auf 2010). Steigerungen gab es im Bereich der Baustoffe (+24 % bezogen auf 2010) und der direkten Emissionen (+4 % bezogen auf 2010).

Wie schon in Kapitel 4.3.2 dargestellt, wurden unter anderem auf der Kläranlage Kamp-Lintfort Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Steigerung der Eigenstromerzeugung durchgeführt. Dies zeigt sich deutlich in der Einsparung beim Verbrauch elektrischer Energie.

Tabelle 4-4: Bottom-Up-CO₂-Bilanz der Kläranlage Kamp-Lintfort (Bezugsjahr 2010) und Differenzen zwischen 2010 und 2018

Bezugsjahr 2010									Differenz 2018 - 2010		
	Type	Beschreibung	Menge		Einheit	THG-Emissionen			THG-Emissionen		
						t CO ₂ e/a	kgCO ₂ e/(E*a)	%	t CO ₂ e/a	kgCO ₂ e/(E*a)	% (v. 2010)
A	Energie										
1	Verbrauch elektrischer Energie	insgesamt	1.540.475		kWh/a	838,02	21,5	32%	-303,54	-8,73	-36%
	Bezug aus dem deutschen Stromnetz	gesamt	1.540.475		kWh/a	838,02		32%			
2	Verbrauch Wärmeenergie	insgesamt				0,00	0,0	0%	0,00	0,00	0%
		Flüssiggas			kWh/a	0,00		0%			
		Erdgas			kWh/a	0,00	0,00	0%			
		Heizöl			m³/a	0,00	0,00	0%			
B	Betriebsmittel										
1	Verbrauch von Betriebsmitteln	insgesamt				35,54	0,9	1%	-2,00	-0,11	-6%
	Fällmittel	Fe-III-Cl	25.629		kg/a	29,47	0,75	1%			
		Poly-Al-Cl	5.371		kg/a	6,07	0,16	0%			
C	Treibstoffe										
1	Treibstoffverbrauch	insgesamt				3,47	0,1	0%	-3,02	-0,08	-87%
	Diesel	Transport Rechengut	2.052		tkm/a	0,41	0,01	0%			
		Transport Sandgut	576		tkm/a	0,12	0,00	0%			
		Transport Klärschlamm	14.736		tkm/a	2,95	0,08	0%			
D	Abfallentsorgung										
1	Abfallentsorgung	insgesamt				744,63	19,1	28%	-4,11	-1,43	-1%
	Verbrennung	Rechengut	68		t/a	25,48	0,65	1%			
	Verbrennung	Klärschlamm	614		t/a	719,15	18,42	27%			
	Verwertung	Sandgut	32		t/a	0,00	0,00	0%			
E	Baustoffe										
1	Baustoff	insgesamt				210,63	5,4	8%	50,25	0,82	24%
A	Direkte Emissionen										
1		CH4	CO2e	N2O	CO2e	803,60	20,6	30%	31,26	-0,69	4%
	Abwasserbehandlung	11,97 t/a	299 t/a	0,93 t/a	278 t/a	577,75	14,80	22%			
	Eindicker	1,02 t/a	26 t/a		0 t/a	25,50	0,65	1%			
	Faulbehälter	0,06 t/a	1 t/a		0 t/a	1,49	0,04	0%			
	Schlamm entwässerung	0,18 t/a	5 t/a		0 t/a	4,61	0,12	0%			
	Klärschlammverbrennung	0,47 t/a	12 t/a	0,61 t/a	181 t/a	192,81	4,94	7%			
	Faulgasverbrennung (BHKW)	0,05 t/a	1 t/a	0,00 t/a	0 t/a	1,44	0,04	0%			
Σ	realer Carbon Footprint					2.635,90	67,5	100%	-231,15	-10,22	-9%

5 Literaturverzeichnis

- Amit Kumar, A. T.-G. (06 2021). Greenhouse gases emission control in WWTS via potential operational strategies: A critical review. 273.
- BMU, Referat IK III 3. (2019). *Trink- und Abwasser klimafreundlich aufbereiten - Fördermöglichkeiten für Kommunen*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- Daelman, M. R., van Voorthuizen, E. M., van Dongen, U. G., Volcke, E. I., & van Loosdrecht, M. C. (22. 07 2012). Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water Research*, 46, S. 3657 - 3670.
- Daelman, M. R., van Voorthuizen, E. M., van Dongen, U. G., Volcke, E. I., & van Loosdrecht, M. C. (01. 05 2013). Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment – results from a long-term study. *Water Science & Technology*, 67, S. 2350–2355.
- Doorn, M. R., Towprayoo, S., Vieira, S. M., Irving, W., Palmer, C., Pipatti, R., & Wang, C. (2006). *WASTEWATER TREATMENT AND DISCHARGE*. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- GaBi. (2020a). GaBi: Datensatz DE. *GaBi: Software und Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung*. sphera; LBP, Universität Stuttgart.
- GaBi. (2020b). GaBi: Datensatz EU 28. *GaBi: Software und Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung*. sphera; LBP, Universität Stuttgart.
- GaBi. (2020c). GaBi: Datensatz GLO. *GaBi: Software und Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung*. sphera; LBP, Universität Stuttgart.
- GEMIS. (2011). GEMIS-Ergebnis-Auszug Datenstand 2011. *GEMIS Version 4.7*. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme.
- GEMIS. (2017). GEMIS-Ergebnis-Auszug Datenstand 2017. *GEMIS Version 4.95*. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme.
- Gori, R., Jiang, L.-M., Sobhani, R., & Rosso, D. (27. 08 2011). Effects of soluble and particulate substrate on the carbon and energy footprint of wastewater treatment processes. *Water Research*, 45.
- Hable, K. (2019). *Life-cycle Assessment für Kläranlagen - Kritische Analyse am Beispiel einer Modellkläranlage*. Diplomarbeit, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, Wien.
- Hoffman, E. (2014). INCOPA Projekt: Life Cycle Analysis of Leading Coagulants: Executive Summary. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology.

- Hottenroth, H., Joa, B., & Schmidt, M. (2013). *Carbon Footprints für Produkte Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen*. Pforzheim: Hochschule Pforzheim, Institut für Industrial Ecology.
- IEA. (15. September 2021). CO₂-Emissionen pro Kopf weltweit nach ausgewählten Ländern im Jahr 2019 (in Tonnen) [Graph]. Statista. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167877/umfrage/co-emissionen-nach-laendern-je-einwohner/> abgerufen
- International Organisation for Standardisation (IOS). (August 2018). ISO 14067:2018-08, Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. Berlin: Beuth-Verlag.
- IPCC. (2007). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Genua: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2018). *National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Hayama, Kanagawa: iGES.
- J.T. Houghton, L. M. (1996). *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jos Frijns, K. W. (2008). *Op weg naar een klimaatneutrale waterketen*. Utrecht: STOWA.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jettena, M. S., & van Loosdrecht, M. C. (02. 03 2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43, S. 4093 - 4103.
- Law, Y., Ye, L., Pan, Y., & Yuan, Z. (30. 03 2015). Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Phil. Trans. R. Soc. B (2012)*, S. 1265 - 1277.
- Lin, L. (2020). *Carbon emission assessment of wastewater treatment plant based on accounting perspective*. Jilin, China: EDP Sciences.
- Mannina, G., Capodici, M., Cosenza, A., Di Trapani, D., & Ekama, G. A. (2020). Greenhouse gases from membrane bioreactors: New perspectives on monitoring and mathematical modeling. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 95 - 116.
- Mannina, G., Cosenza, A., & Ekama, G. A. (09 2017). Greenhouse gases from membrane bioreactors: Mathematical modelling, sensitivity and uncertainty analysis. *Bioresource Technology*, 239, S. 353 - 367.
- Niebuhr, J. (2019). *LACHGASEMISSIONEN DURCH BIOLOGISCHE ABWASSERBEHANDLUNG*. Hamburg: Hamburg Wasser.
- Noyola, A., Paredes, M., Güereca, L., Molina, L., & Zavala, M. (9. 05 2018). Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on

- field data in Mexico and on literature review. *Science of the Total Environment*, 639, S. 84 - 91.
- Office of Research and Development. (2013). *Science and Research at the U.S. Environmental Protection Agency; EPA Progress Report, 2012*. Office of Research and Development.
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team.
- Parravicini, V., Svardal, K., & Krampe, J. (11 2016). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. *Energy Procedia*, 97, S. 246 - 253.
- Parravicini, V., Valkova, T., Haslinger, J., Saracevic, E., Winkelbauer, A., Tauber, J., . . . Lampert, C. (17. April 2015). ReLaKO - Reduktionspotential bei den Lachgas-Emissionen aus Kläranlagen durch Optimierung des Betriebes. Wien: Ministerium für ein lebenswertes Österreich.
- Sharawat, I., Dahiya, R., & Dahiya, R. P. (20. 08 2020). Analysis of a wastewater treatment plant for energy consumption and greenhouse gas emissions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, S. 871 - 884.
- STOWA. (August 2010). Emissies van Broeikasgassen van RWZI's. Amersfoort: STOWA.
- Sweetapple, C., Fu, G., & Butler, D. (2. 06 2014). Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Research*, 62, S. 249 - 259.
- Thöle, D. (2011). Betriebsdaten der Monoverbrennungsanlage des Ruhrverbandes - Berechnungen.
- U.S. EPA. (2012). *Summary Report: Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990–2030*. Office of Atmospheric Programs - Climate Change Division - U.S. Environmental Protection Agency.
- UBA. (Juni 2008). home.eper.de/index.php?pos=/startseite/faq/emissionsfaktoren/co2_biomasse/.
- UBA. (April 2012). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990 - 2010 und erste Schätzungen 2011. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA. (Februar 2020). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA. (05. Juli 2021). *Die Treibhausgase*. Von Umweltbundesamt.de: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> abgerufen

- UNFCCC-Submission, U. . (2021). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- United Nations. (1998). Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change., (S. 21).
- V. Vasilaki, T. M. (14. 04 2019). A decade of nitrous oxide (N₂O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: A critical review. *Water Research* , 161, S. 392 - 412.
- VDA. (2008). Das Nutzfahrzeug - umweltfreundlich und effizient. Frankfurt a. M.: Verband der Automobilindustrie.
- Yapıcıoğlu, P., & Demir, Ö. (2019). *Investigation of GHG emission sources and reducing GHG emissions in a municipal wastewater treatment plant*. Environmental Engineering Department. Sanliurfa, Turkey: Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd.