

# Bewertung der Umweltauswirkungen von Kläranlagen mit Ökobilanzen/LCA

Christian Remy

Kompetenzzentrum Wasser Berlin

**Abstract:** Die Ökobilanz nach ISO 14040 kann die globalen Umweltwirkungen von Kläranlagen umfassend bewerten. Dabei werden durch die Lebenszyklusperspektive alle relevanten direkten und indirekten Umweltwirkungen über ein Stoffstrommodell erfasst und mit verschiedenen Indikatoren nachvollziehbar bewertet. Der Beitrag beschreibt das schrittweise Vorgehen bei einer Ökobilanz und zeigt anhand von Beispielen mögliche Anwendungsfelder und Ergebnisse auf.

**Key Words:** Ökobilanz, Life Cycle Assessment, CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Treibhausgase, Umweltwirkungen

## 1 Einleitung

Die ganzheitliche Erfassung und Bewertung aller Umweltwirkungen der menschlichen Aktivitäten auf diesem Globus gewinnt immer mehr an Bedeutung. Gesellschaft, Politik und Entscheidungsträger brauchen verlässliche Informationen über die ökologische Nachhaltigkeit von Systemen und Alternativen, um diesen Aspekt in die Planung und Umsetzung von Maßnahmen einzubeziehen. Am Beispiel des anthropogen verursachten Klimawandels und der erforderlichen Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen wird deutlich, dass alle Sektoren Anstrengungen unternehmen müssen, um solche globalen Umweltprobleme zu verringern. Auch der Sektor der Abwasserreinigung wird zunehmend mit diesen Anforderungen konfrontiert, so dass eine verlässliche, robuste und mit verhältnismäßigem Aufwand anwendbare Methode zur Erfassung dieser Umweltwirkungen gefragt ist.

Eine bewährte Methode zur systematischen und quantitativen Erfassung aller Umweltwirkungen von technischen Systemen ist die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment oder kurz LCA). Diese Methodik wurde in den 1990er Jahren entwickelt, um Produkte und Systeme über ihren Lebenszyklus zu bewerten. Der Lebenszyklus schließt dabei neben den direkten Wirkungen des Systems (z.B.

Lachgasemissionen auf der Kläranlage) auch alle relevanten vor- und nachgelagerten Prozesse mit ein (z.B. Stromerzeugung im Kraftwerk, Herstellung von Chemikalien, Entsorgung von Klärschlamm). So können die „gesamten“ Umweltwirkungen eines Systems über diese sehr weite Definition der zu betrachtenden Systemgrenzen erfasst werden. Je nach Ziel der Studie und dem Verhältnis von Arbeitsaufwand und Ergebnis sind dabei geeignete Abschneidekriterien zu definieren, um die mengenmäßig und umwelttechnisch relevanten Wirkungen abzubilden.

Weiterhin bezieht die Ökobilanz ihre Ergebnisse immer auf eine genau definierte funktionelle Einheit, die für alle betrachteten Varianten/Systeme gleich ist. Diese Funktionsgleichheit ermöglicht einen quantitativen Vergleich verschiedener Varianten unter „fairen“ Bedingungen, also immer im Hinblick auf gleiche Funktion. Sollte ein System mehrere Funktionen aufweisen (z.B. Abwasserreinigung plus Nährstoffrückgewinnung), lässt sich auch das in der Ökobilanz über geeignete Ansätze berücksichtigen.

Zur Erfassung der globalen Umweltwirkungen von Kläranlagen werden Ökobilanzen schon seit den 1990er Jahren in der Wissenschaft (Corominas, Foley et al. 2013) und seit einigen Jahren auch vermehrt in der Praxis eingesetzt. Dabei gibt es verschiedene Zielsetzungen für eine Ökobilanz, u.a.:

- Erfassung der spezifischen Umweltwirkungen einer bestehenden Anlage (z.B. CO<sub>2</sub>-Fußabdruck)
- Optimierung einer bestehenden Anlage hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen (z.B. Einsparung fossiler Energieträger)
- Variantenvergleich von verschiedenen technischen Optionen bei Umbau oder Erweiterung einer Kläranlage (z.B. 4. Reinigungsstufe)
- Bewertung neuer Konzepte und Technologien zur weiteren Optimierung/Beurteilung der Nachhaltigkeit (z.B. Rückgewinnung von Wertstoffen)

Da eine Kläranlage primär dem Gewässerschutz dient und damit eine ökologisch wichtige Funktion erfüllt, ist die Abwasserreinigung und damit die Ablaufqualität berechtigterweise das oberste Ziel im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit. Dennoch sind für den Betrieb einer Kläranlage teils erhebliche Aufwendungen für Strom, Chemikalien und Material für Infrastruktur zu erbringen, deren Bereitstellung wiederum Umweltwirkungen nach sich zieht. Auch die Entsorgung von Abfällen wie Klärschlamm kann mit negativen Umweltfolgen verbunden sein. Die Minimierung dieser Umweltwirkungen sollte daher ein weiteres Ziel der Betreiber sein, um z.B. den mit der Abwasserreinigung verbundenen Ausstoß von

Treibhausgasen so niedrig wie möglich zu halten. Die Abwägung zwischen diesem „Aufwand“ für die Abwasserreinigung (= Strom, Chemikalien, ...) und dem damit erzielten Nutzen (= verbesserte Qualität der Gewässer) lässt sich über eine Ökobilanz mit einer definierten Methodik abbilden. Dabei ist der Fokus der Ökobilanz durch ihre globale modellhafte Abschätzung von Wirkungen eher für global wirksame Parameter geeignet (z.B. Treibhausgasemissionen, Verbrauch endlicher Ressourcen) als für Umweltwirkungen, die eher lokal wirken und daher stärker von örtlichen Randbedingungen abhängen (z.B. Eutrophierung von Gewässern).

Im Folgenden wird die Methodik der Ökobilanz kurz erläutert und die wichtigsten Arbeitsschritte beschrieben. Anschließend wird anhand einiger Fallbeispiele exemplarisch die Anwendung von Ökobilanzen zur Beurteilung der Umweltwirkungen von Kläranlagen aufgezeigt.

## **2 Methodik der Ökobilanz**

Die Vorgehensweise in einer Ökobilanz ist nach ISO genau definiert (ISO 14040 2006, ISO 14044 2006) und beinhaltet immer vier Arbeitsschritte (Abbildung 1):

1. Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen
2. Erhebung einer Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Interpretation und Auswertung der Ergebnisse

Der Ablauf dieses Prozesses ist iterativ vorgesehen, so dass ggf. Anpassungen an Untersuchungsrahmen und Sachbilanz möglich sind, nachdem die ersten Ergebnisse der Ökobilanz vorliegen. Letztlich kommt es darauf an, die am Ende genutzten Definitionen und auch die Eingabedaten der Sachbilanz transparent zu berichten und gut zu begründen.

Wenn eine Ökobilanz formell dem ISO-Standard genügen soll, ist für vergleichende Studien, deren Ergebnisse veröffentlicht werden, eine kritische Prüfung durch externe Experten verpflichtend. Dabei prüft ein externer Gutachter bzw. ein Gremium von Gutachtern die Definitionen der Ökobilanz, ggf. die Sachbilanzdaten, und vor allem die formale Vollständigkeit des Berichts mit allen geforderten Details. Dieser „critical review“ Prozess dient der Qualitätssicherung und bestätigt die formale Konformität der Ökobilanz mit dem ISO-Standard. In der Praxis werden solche kritischen Prüfungen für Ökobilanzen in der Abwasserreinigung wenig durchgeführt, da es sich meist um Forschungsarbeiten

oder Zuarbeit zum Berichtswesen handelt, wo die formale Anerkennung des ISO-Standards nicht notwendig ist.

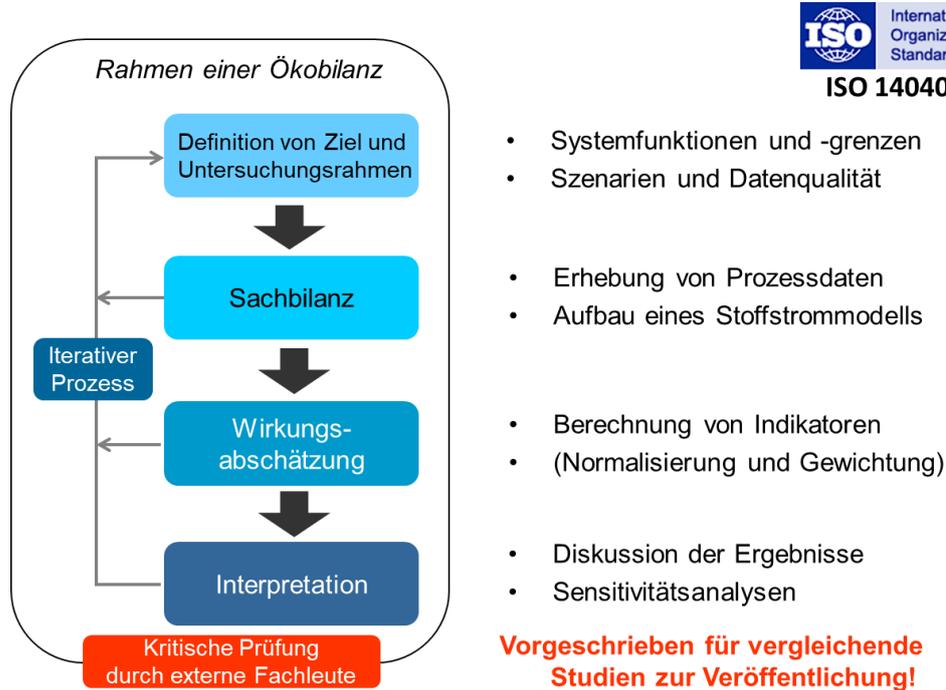


Abbildung 1: Vorgehensweise bei einer Ökobilanz nach ISO 14040/44

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte der Ökobilanz kurz beschrieben.

## 2.1 Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

Dieser Arbeitsschritt definiert als erstes formal das Ziel der Ökobilanz. Hier ist es wichtig, eine genaue und eindeutige Zielstellung zu formulieren, damit die nachfolgenden Definitionen auf dieses Ziel ausgerichtet werden können. Eine genauere Eingrenzung der Zielgruppe (z.B. Klärwerksleitung, Management, Planer, Öffentlichkeit) kann hilfreich sein, um die Art der Präsentation der Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen festzulegen.

Danach wird die Grundfunktion des betrachteten Systems genau definiert (z.B. „Abwasserreinigung von kommunalem Abwasser auf definierte Ablaufwerte“) und eine geeignete funktionelle Bezugseinheit gewählt. Auf diese funktionelle Einheit werden nachher alle Ergebnisse bezogen und so die verschiedenen Varianten/Systeme/Szenarien vergleichbar gemacht. Im Bereich der Kläranlage haben sich zwei funktionelle Einheiten bewährt: a) pro Volumen des behandelten Abwassers [ $1/m^3$ ] und b) pro Einwohnerwert und Jahr [ $1/(EW*a)$ ]. Für letztere Einheit spricht, dass sie die Belastung des Abwassers mit einbezieht, die ja maßgeblich den Aufwand für die Reinigung bestimmt. Beim Bezug auf das

behandelte Volumen wird die Konzentration bzw. Verdünnung der Belastung nicht berücksichtigt, was beim Vergleich mehrerer Anlagen mit unterschiedlichen Zulaufkonzentrationen berücksichtigt werden muss.

Eine der wichtigsten Definitionen betrifft die betrachteten Systemgrenzen. Hier werden üblicherweise die Grenzen so gesetzt, dass alle relevanten Prozesse der Kläranlage sowie die wichtigen vor- und nachgelagerten Systeme mit einbezogen werden. Typische Systemgrenzen für eine Ökobilanz einer gesamten Kläranlage umfassen die Abwasserreinigung und die Behandlung und Entsorgung des anfallenden Klärschlammes (Abbildung 2). Dazu kommen die Bereitstellung der wichtigsten Betriebsmittel (Strom, Chemikalien wie Flockungsmittel oder Polymere zur Schlammentwässerung, Treibstoffe) und dem Material zur Errichtung der Infrastruktur (Beton, Baustahl, ...). Als Emissionen des Systems wird das gereinigte Abwasser berücksichtigt sowie die wichtigsten Luftschadstoffe aus dem Anlagenbetrieb (z.B.  $N_2O$ ,  $CH_4$ , Emissionen des BHKW).

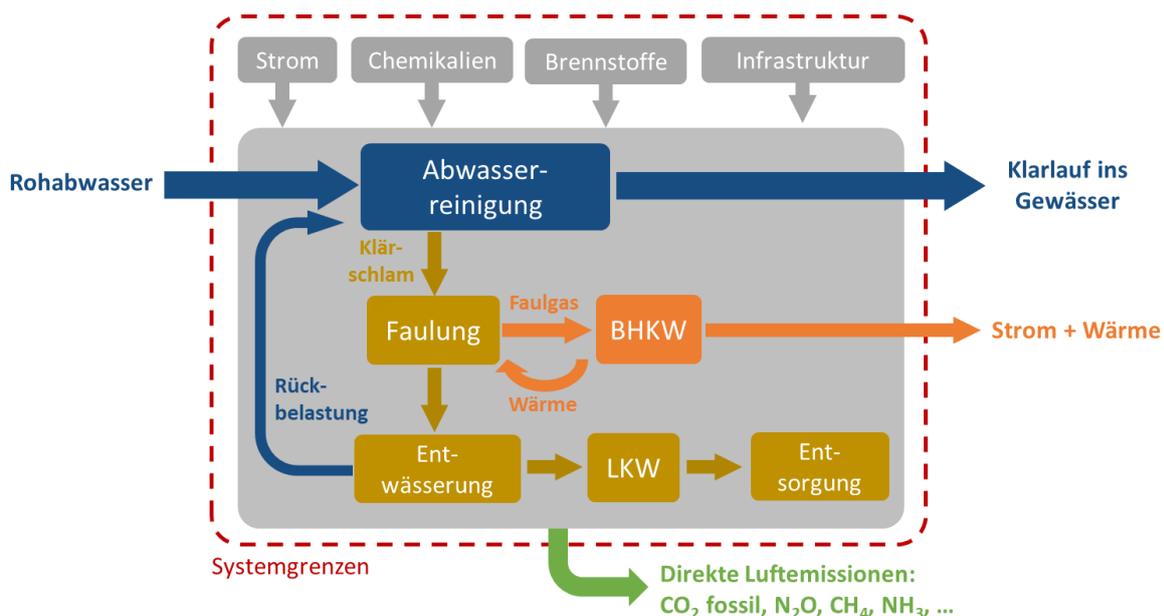


Abbildung 2: Typische Systemgrenzen für eine Ökobilanz eines Klärwerks

Für gezielte Betrachtungen einzelner Systembestandteile (z.B. vierte Reinigungsstufe, P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm) können die Systemgrenzen auch enger gefasst werden. Wichtig ist dabei, dass die relevanten Wirkungen der Systeme auf die gesamte Kläranlage mit abgebildet werden. Dabei spielt vor allem die Rückbelastung der Kläranlage mit Prozess- oder Spülwässern bzw. anfallendem Klärschlamm eine wichtige Rolle.

Weiterhin ist eine genaue Definition und Beschreibung der betrachteten Varianten/Szenarien notwendig. Hier bietet sich eine grafische Abbildung der Varianten über geeignete Fließschemata bzw. Blockdiagramme an. In vielen Fällen wird ein Grundzustand des Systems definiert („Referenzszenario“), dem dann verschiedene neue Varianten gegenübergestellt werden.

Abschließend ist an dieser Stelle eine generelle Beschreibung der genutzten Eingangsdaten und der Datenqualität gefordert. Oftmals werden reale Betriebsdaten einer Kläranlage für den Grundzustand genutzt, wohingegen mögliche Varianten eines Umbaus oder einer Erweiterung auf Planungszahlen bzw. Ergebnissen aus Pilotanlagen oder Vorstudien beruhen. Daher ist die Beurteilung der Datenqualität ein wichtiger Hinweis auf die Verlässlichkeit der Eingangsdaten und damit ggf. auf mögliche Unsicherheiten für die Ergebnisse der Ökobilanz.

## 2.2 Erhebung der Sachbilanz

In der Sachbilanz werden alle benötigten Eingangsdaten erhoben und berichtet. Diese Eingangsdaten werden dann üblicherweise in ein Stoffstrommodell der Kläranlage übersetzt, um je nach geforderter Detailtiefe der Untersuchung die einzelnen Prozessschritte und Stoffflüsse innerhalb der Kläranlage abzubilden. Es empfiehlt sich dabei die Verwendung einer Ökobilanz-Software mit grafischer Darstellung der Stoffstrommodelle (z.B. UMBERTO® (IFU 2018)) auf Basis von Prozessnetzen (Abbildung 3). Diese ermöglichen die Betrachtung und Validierung der einzelnen Stoffflüsse und Massenbilanzen.

Als Eingangsdaten nutzt die Ökobilanz meist mittlere Betriebsdaten für den „durchschnittlichen“ Zustand der Kläranlage (Jahresbilanz):

- Kumuliertes Volumen und mittlere Qualität der Abwasserströme bzw. des Klärschlammes (z.B. Volumen, AFS, CSB, Gesamt-N, Gesamt-P, ...)
- Kumulierte Betriebsmittel (z.B. Strom, Wärme, Flockmittel, Polymer, Aktivkohle, ...)
- Kumulierte Produkte (z.B. Strom und Wärme aus dem BHKW)

Diese Daten werden erhoben und auf Plausibilität geprüft. Oftmals müssen dabei Daten angepasst bzw. ergänzt werden, um die Massenbilanz zu schließen und Datenlücken auszugleichen. Für wichtige direkte Emissionen auf der Kläranlage (z.B.  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , ...) können allgemeine oder spezifisch bestimmte Emissionsfaktoren genutzt werden.

Die Datenerhebung sollte in engem Kontakt mit dem Betriebspersonal der Kläranlage bzw. vom Betreiber geschehen. Eine abschließende Validierung der endgültigen Eingangsdaten in Zusammenarbeit mit dem Betreiber ist geboten, um mögliche Fehler in der Bilanz oder beim Datenaustausch aufzudecken.

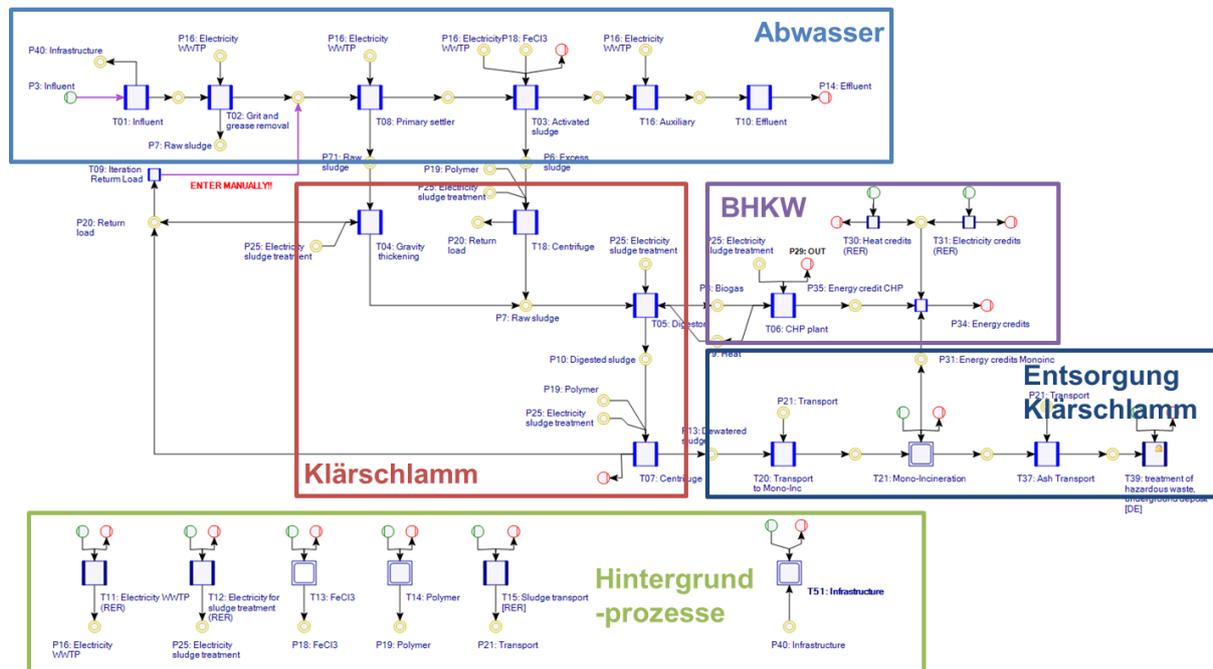


Abbildung 3: Stoffstrommodell eines Klärwerks in LCA-Software UMBERTO®

Eine wichtige Rolle bei der Sachbilanz spielt oft die Extrapolation von Ergebnissen aus der Forschung/Entwicklung/Planung in die Praxis. Hier ist eine enge Zusammenarbeit mit verschiedenen Fachleuten angeraten, um die Annahmen für die Sachbilanz gemeinsam zu entwickeln und zu validieren. Bestimmte Bilanzdaten können dabei direkt aus Vorstudien abgeleitet werden (z.B. Ablaufqualität eines Verfahrens, Betriebsmitteleinsatz), während andere Parameter wie Stromverbrauch und Infrastruktur ein sorgfältiges Hochskalieren („up-scaling“) der Prozesse erfordern.

Für die Bilanzierung der vor- und nachgelagerten Prozesse wie Bereitstellung von Netzstrom, Herstellung von Chemikalien oder die Entsorgung von Abfällen stehen vorgefertigte Datensätze aus Ökobilanz-Datenbanken zur Verfügung, z.B. die international anerkannte Datenbank ecoinvent (Ecoinvent 2017).

## Bewertung über Umweltindikatoren

Die Abschätzung der Umweltwirkungen in der Ökobilanz beruht auf wissenschaftlichen Modellen und Methoden. Die Ökobilanz bildet damit „potentielle“ Umweltwirkungen über bestimmte Indikatoren ab, in dem sie jedem Stofffluss bestimmte Charakterisierungsfaktoren zuordnet. Für die verschiedenen Umweltwirkungen und Stoffe gibt es jeweils spezifische Faktoren, die über alle Stoffe aufsummiert werden und damit die gesamte Umweltwirkung für einen Indikator darstellen.

Es sind verschiedene Methoden zur Wirkungsabschätzung entwickelt und publiziert worden. Alle neueren Methoden berücksichtigen die gesamte Wirkungskette von der Emission über Verlagerung und Schädigung auf bestimmte Effekte bis hin zum Schaden für die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcenverfügbarkeit (Abbildung 4).

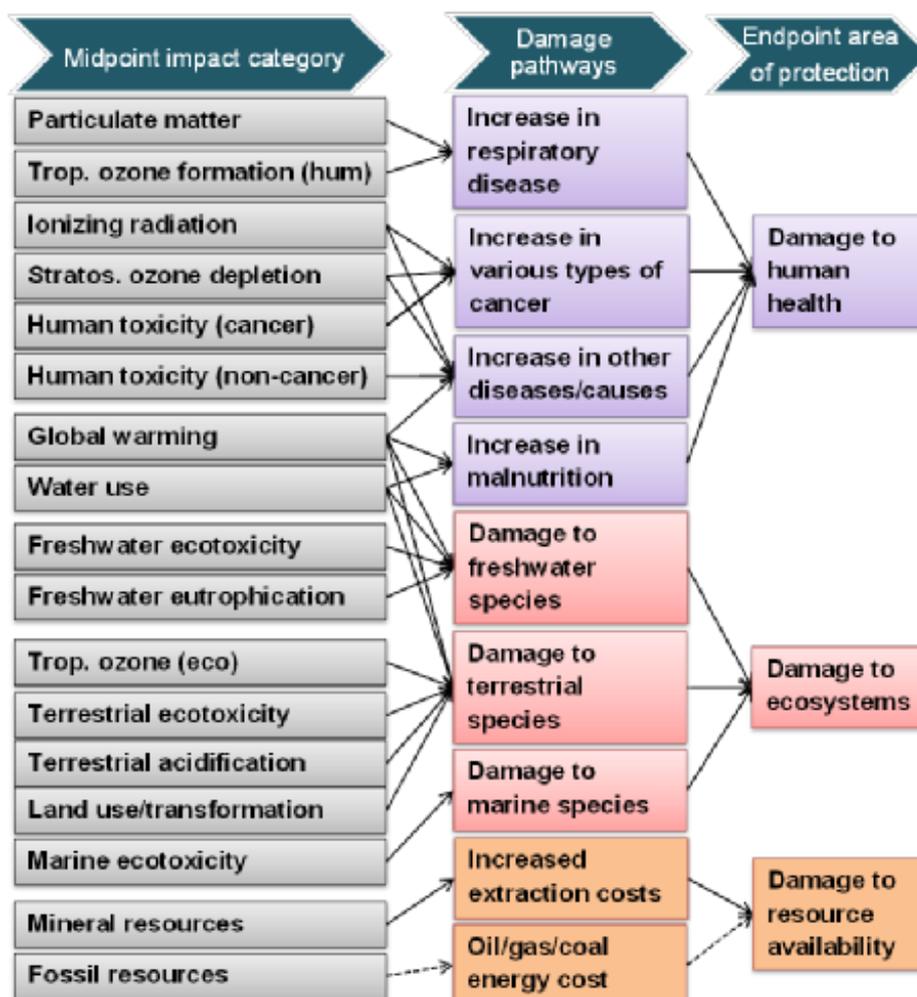


Abbildung 4: Beispiel für mögliche Umweltindikatoren einer Ökobilanz entlang der Wirkungskette (Huijbregts, Steinmann et al. 2017)

Dabei werden die einzelnen Umwelteffekte (z.B. globale Erwärmung) über verschiedene Methoden/Wirkpfade bis zum möglichen Schaden modelliert. Jedoch steigt im Verlauf der Wirkungskette die Unsicherheit der Modelle, und durch die immer höhere Aggregation ist die Ursache-Wirkungs-Beziehung nur noch schwierig nachzuvollziehen.

Meist werden daher für Ökobilanzen im Abwassersektor nur ausgewählte Indikatoren für spezifische Umwelteffekte berichtet, um sowohl die Unsicherheit der Aussagen zu vermeiden als auch die Transparenz der Ergebnisse zu verbessern. Typische Indikatoren einer Ökobilanz für Kläranlagen umfassen z.B.

- Kumulierter Energieaufwand (fossil bzw. nicht erneuerbar)
- Treibhausgaspotential
- Eutrophierung
- Versauerung
- Aquatische Ökotoxizität
- Humantoxizität

Die Erfahrung zeigt, dass im Bereich der Abwasserreinigung diese Indikatoren eine gute Beurteilung der relevanten Umweltwirkungen der Abwasserreinigung ermöglichen. Dabei wird sowohl der Aufwand der Kläranlage (Energieträger, Treibhausgasemissionen), die Wasserqualität (Nährstoffe, Schadstoffe), aber auch die sonstigen Emissionen in Luft und Boden (BHKW-Abgase, Klärschlamm) mit einbezogen.

Oft wird von den Entscheidungsträgern eine abschließende Bewertung der verschiedenen Indikatoren zueinander gefordert. Diese Abwägung z.B. zwischen erhöhtem Treibhausgasemissionen einerseits und besserer Wasserqualität andererseits lässt sich allerdings nicht wissenschaftlich objektiv lösen, sondern ist von der subjektiven Gewichtung der einzelnen Umweltaspekte abhängig. Diese Gewichtung hängt immer vom Betrachter ab und kann daher je nach Perspektive und Zielstellung unterschiedlich ausfallen.

Eine Möglichkeit zur besseren Einschätzung der Bedeutung der einzelnen Indikatorergebnisse kann über eine Normalisierung erreicht werden. Dabei wird das Ergebnis jedes Indikators durch die gesamten Umweltwirkungen eines Einwohners geteilt und damit normalisiert. Jetzt ist der relative Anteil des jeweiligen Systems (hier: der Kläranlage) an den gesamten Umweltwirkungen der Gesellschaft sichtbar und kann bei der abschließenden Bewertung mit einbezogen werden. Normalisierte Ergebnisse für eine Kläranlage zeigen oft, dass deren positive Wirkung auf die

Gewässerqualität einen hohen Anteil an diesem Umwelteffekt hat, während der Aufwand über Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen nur einen geringen Anteil der menschlichen Aktivität ausmacht. Dies bestätigt die anfangs aufgestellte Argumentation, dass die Primäraufgabe der Kläranlage der Gewässerschutz ist und der verhältnismäßige Aufwand dafür auch in der Ökobilanz gerechtfertigt ist. Dennoch ist für die gleiche Leistung der Abwasserreinigung ein Betrieb mit minimalem Aufwand an Energie und Ressourcen nachhaltiger und damit besser, was über die jeweiligen Indikatoren abgebildet wird.

### **2.3 Interpretation und Auswertung**

Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse einer Ökobilanz sollten verschiedene Punkte umfassen. Neben einer geeigneten Ergebnisdarstellung und Analyse können weitere Untersuchungen zur Unsicherheit der Aussagen sowie ggf. Anpassungen des Untersuchungsrahmens erforderlich sein.

Die Ergebnisse einer Ökobilanz sind die Indikatorwerte bezogen auf die gewählte funktionelle Einheit. Dabei ist sowohl die Darstellung der absoluten Zahlen als auch der relative Beitrag jedes Teilsystems zu den Indikatorwerten interessant. Die Ergebnisse sollten sinnvoll aufgeschlüsselt werden, so dass der Beitrag einzelner Teile der Kläranlage (z.B. Vorreinigung, Biologie, Schlammbehandlung) bzw. einzelner Einflussfaktoren (Strom, Chemikalien, Klärschlammentsorgung) sichtbar wird. So lassen sich schnell die Haupteinflussgrößen („hot spots“) für bestimmte Umwelteffekte erkennen und geeignete Maßnahmen zur Verbesserung ableiten.

Wenn Veränderungen in Bezug auf einen Grundzustand (z.B. Erweiterung einer Kläranlage, neue Verfahren der Reinigung oder Rückgewinnung von Ressourcen) analysiert werden, bietet sich oft auch die Differenzbetrachtung zwischen Grundzustand und den Varianten an. Dadurch werden alle gleichbleibenden Parameter bzw. Effekte ausgeblendet, und der Fokus liegt auf den Veränderungen durch die neuen Verfahren.

Über geeignete Sensitivitätsanalysen können einzelne entscheidende Eingabedaten der Ökobilanz oder auch Systemdefinitionen variiert werden, um die Stabilität der Ergebnisse (z.B. in einem Verfahrensvergleich) in Abhängigkeit der gewählten Eingangsdaten bzw. Definitionen zu beurteilen. Bei Bewertungen von zukünftigen Entwicklungen und Technologien ist auch die mögliche Veränderung von Hintergrunddaten mit einzubeziehen (z.B. grüner Strommix in 2050).

Eine gemeinsame Diskussion und Validierung der Ergebnisse mit den Betreibern bzw. den Verantwortlichen für die Eingabedaten ist immer sinnvoll. Dabei können die Ergebnisse zusammen auf Plausibilität geprüft werden, und das

Verständnis für die Ökobilanz-Methodik und deren Vor- und Nachteile wird bei allen Beteiligten verbessert. Oft entstehen bei der Betrachtung der Ergebnisse Fragen, die dann im weiteren Verlauf geklärt werden können oder zur Präzisierung von Systemgrenzen und/oder Eingabedaten führen. Dieser Prozess ist explizit in der Ökobilanzmethodik angelegt („iteratives Vorgehen“) und damit ein wichtiger Bestandteil dieser Bewertung.

### 3 Beispiele aus der Anwendung

Im Folgenden werden am Beispiel verschiedene Zielstellungen und die zugehörigen Ergebnisse von Ökobilanzen im Bereich Kläranlagen beschrieben.

#### 3.1 Bewertung eines bestehenden Klärwerks

Ein oft gefragter Einzelaspekt in der Umweltwirkung eines Klärwerks ist der Beitrag zum Ausstoß von Treibhausgasen. Das Beispiel zeigt hier den gesamten Treibhauseffekt des Betriebs des Klärwerks Steinhof (Abbildung 5). Die Bilanz zeigt einzeln die Beiträge des Klärwerks (Abwasserreinigung), der Schlammbehandlung und -entsorgung, und der Nutzung des Klarwassers in der landwirtschaftlichen Verregnung bzw. dessen Ableitung über ein Rieselfeld in die Gewässer. Hauptbeiträge sind der Strombedarf der einzelnen Stufen, aber auch die direkten Emissionen von Lachgas und Methan. Hohe Gutschriften entstehen in der Schlammbehandlung durch die Nutzung des Faulgases zur Erzeugung von Strom und Wärme, aber auch durch die im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe.

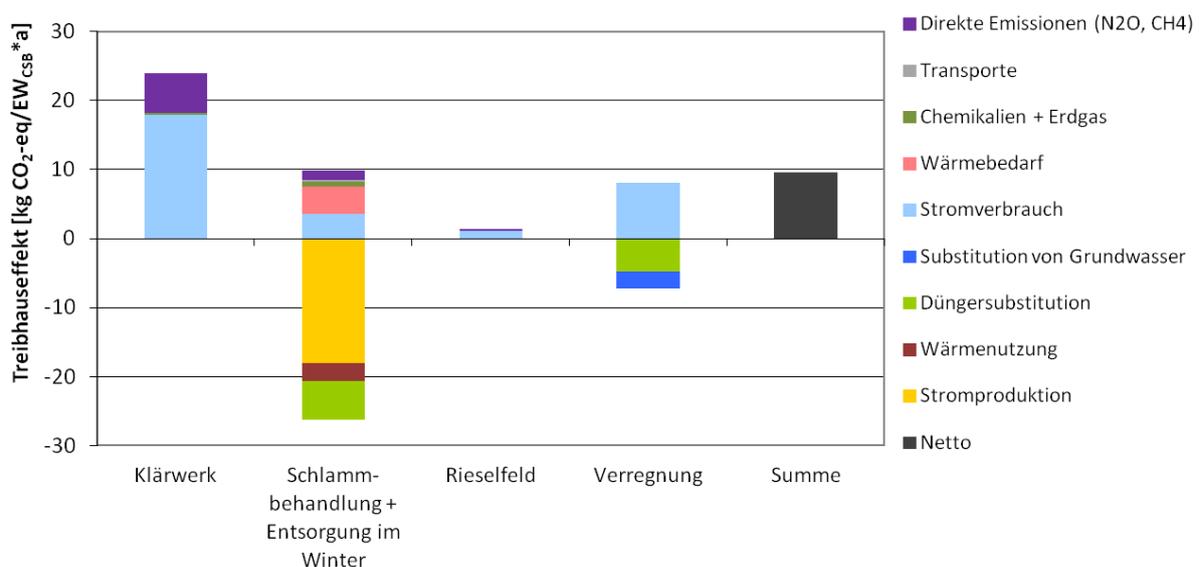


Abbildung 5: Treibhausgasemissionen des Klärwerks Steinhof (Braunschweig) in 2010 (Remy 2012)

Die normalisierten Ergebnisse für verschiedene Umweltindikatoren der Ökobilanz zeigen, dass die Kläranlage trotz weitgehender Reinigung des Abwassers immer noch zur Eutrophierung und zur aquatischen Ökotoxizität beiträgt. Auch die landwirtschaftliche Entsorgung der Klärschlämme führt zu einem relativ hohen Beitrag zur Boden-Ökotoxizität über den Eintrag von Schwermetallen. Dagegen hat die Anlage für die Effekte Energieaufwand und Treibhausgase nur einen geringen Beitrag ( $< 0.3\%$ ) zu den gesamten Umweltwirkungen eines Einwohners.

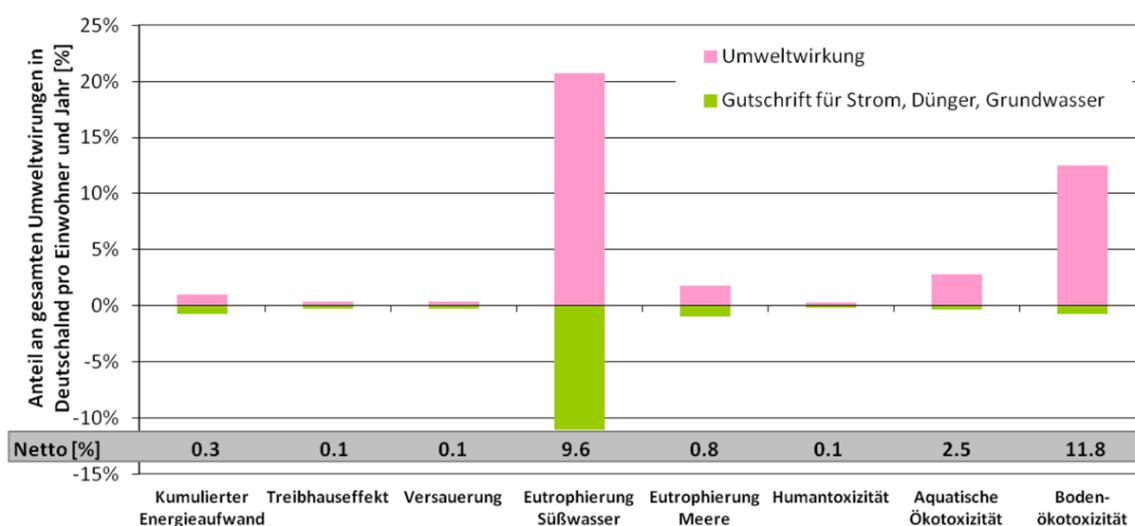


Abbildung 6: Normalisierter ökologischer Fußabdruck der Kläranlage Steinhof (Braunschweig) mit landwirtschaftlicher Klärschlammmentsorgung (Remy 2012)

### 3.2 Verfahrensvergleich bei Erweiterung/Umbau

Steigende Anforderungen an die Ablaufqualität von Kläranlagen erfordern den Ausbau und die Einführung weiterer Verfahren („4. Reinigungsstufe“). Der ökobilanzielle Vergleich zeigt, dass die verschiedenen Verfahren teils erhebliche Unterschiede in Energieaufwand und damit verbundenen Treibhausgasemissionen aufweisen.

So ist für die nachgeschaltete weitestgehende Entfernung von Phosphor (Gesamt-P  $< 0.1$  mg/L) eine Flockung und Filtration notwendig. In Kombination mit einer Desinfektion (z.B. für Badegewässerqualität im Abstrom der Kläranlage) ergeben sich für eine Beispielanlage in Berlin die dargestellten zusätzlichen Treibhausgasemissionen für verschiedene Filtrationsverfahren (Abbildung 7). Es wird deutlich, dass gerade die Membranverfahren deutlich höhere Verbräuche an Strom und Chemikalien benötigen als beispielsweise Raumfilter oder Mikrosiebe.

In Abhängigkeit der gewählten Zielwerte für die Gewässer lässt sich hier also der zusätzlich notwendige Aufwand und die damit verbundenen Umweltwirkungen abschätzen.

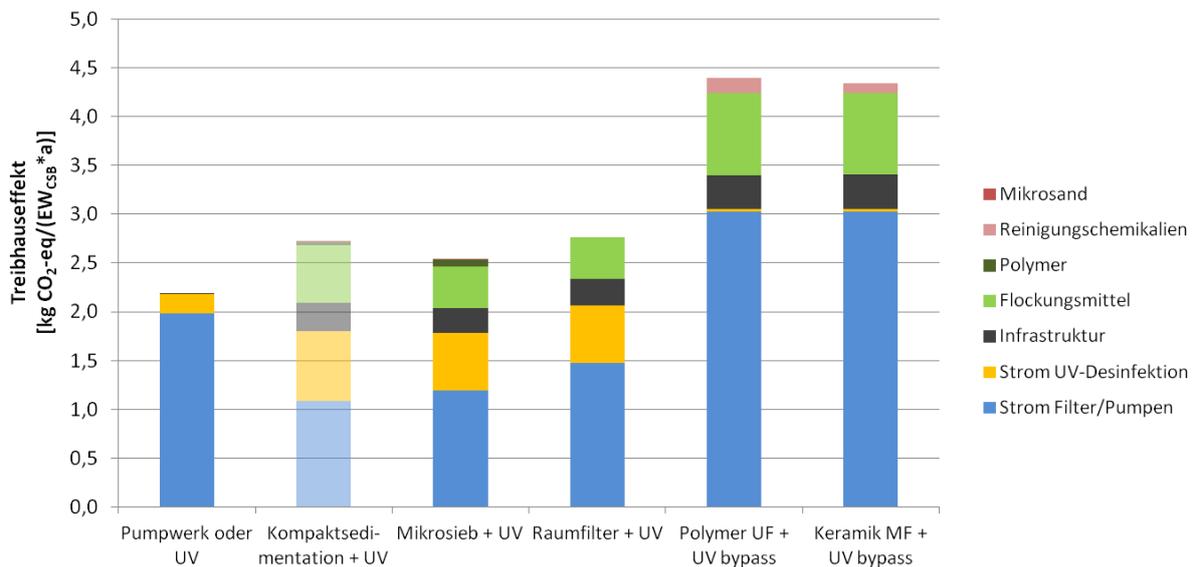


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen für Verfahrensvarianten der nachgeschalteten P-Elimination und Desinfektion (Remy, Miehe et al. 2014)

Bei einer Integration von Verfahren zur Entfernung organischer Spurenstoffe kann sich der Treibhauseffekt der Kläranlage noch einmal deutlich erhöhen (Abbildung 8). Je nach Verfahren und angewandter Dosierung von Ozon und Aktivkohle liegt der Beitrag bei +21% bis zu +150% in Bezug auf die bestehende Kläranlage.

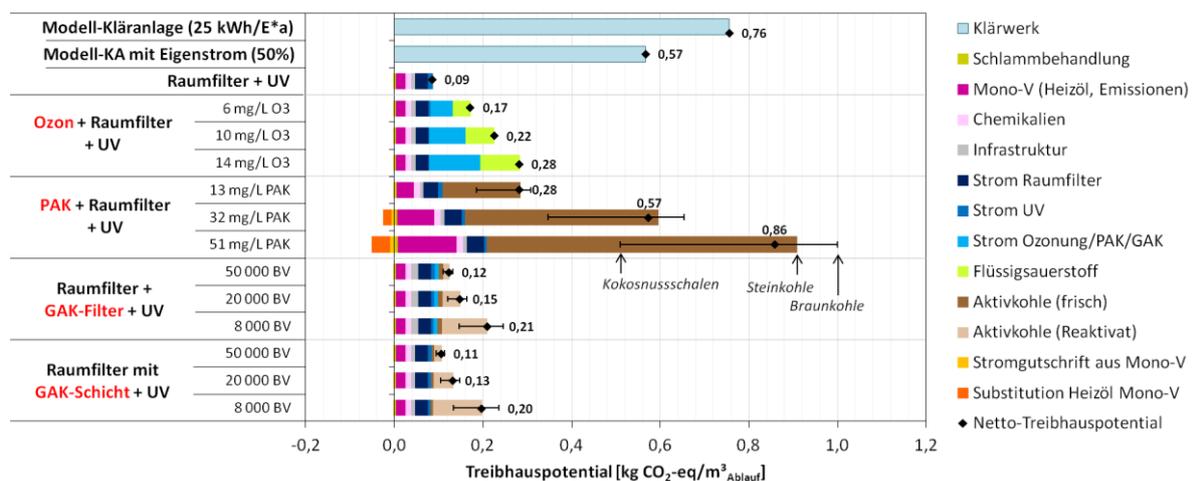


Abbildung 8: Treibhausgasemissionen für Verfahrensvarianten der nachgeschalteten Entfernung von P, Spurenstoffen, und Desinfektion (Remy and Miehe 2017)

Beide Beispiele verdeutlichen, dass durch neue Anforderungen der Aufwand der Reinigung und dessen Umweltwirkungen erheblich ansteigen können und sowohl die Auswahl des Verfahrens als auch die jeweiligen Zielwerte im Gewässer dabei eine wichtige Rolle spielen.

### 3.3 Bewertung neuer Konzepte und Systeme

Auch bei der Bewertung neuer Konzepte können Ökobilanzen hilfreich sein. Mit dem Ziel einer energiepositiven Kläranlage kann eine erweiterte Vorklä rung helfen, so viel wie möglich Primärschlamm und damit Biogaspotential aus dem Abwasser zu gewinnen. Allerdings sind dann neue Verfahren zur Stickstoffentfernung im Hauptstrom (z.B. Anammox) notwendig, die womöglich höhere Lachgasemissionen bedingen. Ökobilanzielle Ergebnisse zeigen, dass tatsächlich energiepositive Kläranlagen vom Konzept her möglich sind (Abbildung 9). Allerdings verhindern die erhöhten Lachgasemissionen auf der Kläranlage und auch in der Klärschlammmentsorgung über Monoverbrennung einen klimaneutralen Betrieb des Systems.

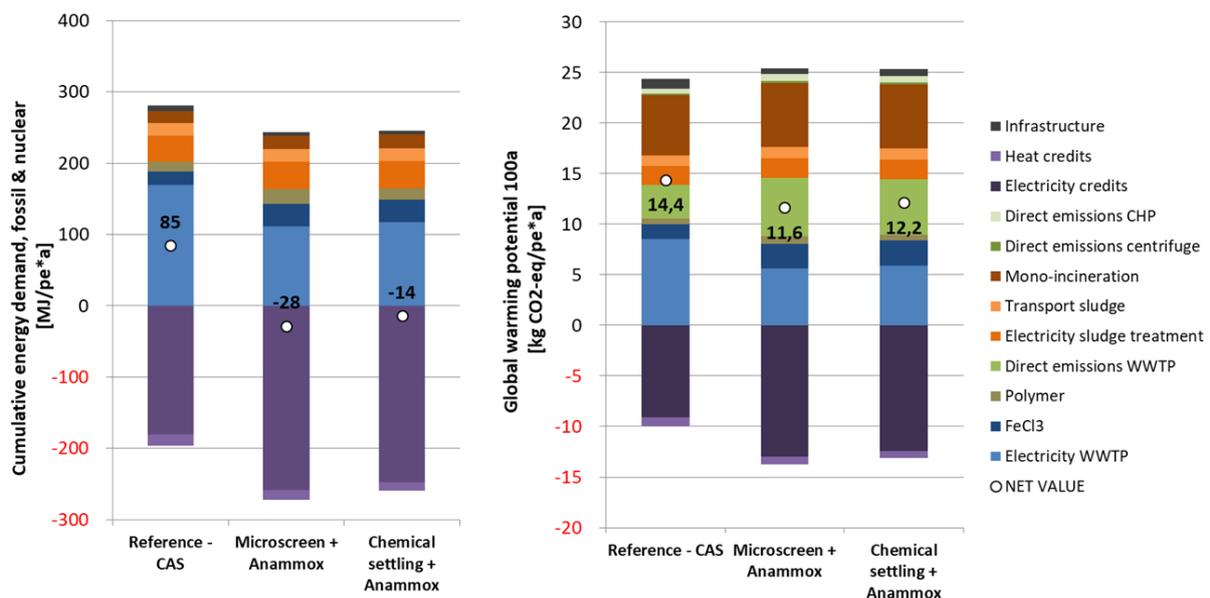


Abbildung 9: Primärenergieaufwand (links) und Treibhausgasemissionen (rechts) von Referenzklärwerk und Varianten mit erweiterter Vorklä rung und Hauptstrom-Anammox (Remy and Cazalet 2018)

## 4 Fazit

Die Ökobilanz bietet ein geeignetes Werkzeug zur umfassenden Beurteilung der globalen Umweltwirkungen von Kläranlagen. Gestützt auf eine standardisierte Vorgehensweise lässt sich die Methodik auf verschiedene Anwendungsfälle anpassen und liefert hilfreiche Erkenntnisse für die Entscheidungsfindung bei Umbau, Erweiterung oder im Hinblick auf neue Konzepte der Abwasserreinigung. Ein enger Austausch zwischen den Bearbeitern der Ökobilanz und den Betreibern der Kläranlage bzw. den Entscheidungsträgern ist geboten, um gemeinsam eine geeignete Methodik zu entwickeln und repräsentative Eingabedaten zu erheben und zu validieren. Das erhöht die Plausibilität der Ergebnisse, schafft Vertrauen in die Methodik und trägt insgesamt zur Verbreitung dieses Ansatzes der Bewertung bei.

## 5 Literatur

Corominas, L., J. Foley, J. S. Guest, A. Hospido, H. F. Larsen, S. Morera and A. Shaw (2013). "Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art." Water Research **47**(15): 5480-5492.

Ecoinvent. (2017). "Ecoinvent data v3.4, ecoinvent reports No. 1-26, Swiss Center for Life Cycle Inventories, [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)."

Huijbregts, M. A. J., Z. J. N. Steinmann, P. M. F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander and R. van Zelm (2017). "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level." International Journal of Life Cycle Assessment **22**(2): 138-147.

IFU (2018). Umberto - Software für das betriebliche Stoffstrommanagement, Version Umberto LCA+ (Umberto - software for operational substance flow management, version Umberto LCA+). Hamburg, Germany, Institut für Umweltinformatik GmbH.

ISO 14040 (2006). Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland, International Standardisation Organisation.

ISO 14044 (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, International Standardisation Organisation.

Remy, C. (2012). Ökobilanzielle Bewertung des Braunschweiger Modells der Abwasserwiederverwendung über Life Cycle Assessment. 45. Essener Tagung, Essen, Germany, ISA Aachen.

Remy, C. and D. Cazalet (2018). POWERSTEP Deliverable D5.5: Recommendations for ecoefficient new concepts of energy positive WWTPs. Berlin, Germany, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.

Remy, C. and U. Mieke (2017). Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Aktivkohleadsorption und Ozonung zur Spurenstoffentfernung in Berlin. 5 Jahre Kompetenzzentren Spurenstoffe KomS BW, KOM-M.NRW und VSA Plattform –

Jubiläumsveranstaltung am 28./29.06.2017, Friedrichshafen, Germany, KomS Baden-Württemberg.

Remy, C., U. Miehe, B. Lesjean and C. Bartholomäus (2014). "Comparing environmental impacts of tertiary wastewater treatment technologies for advanced phosphorus removal and disinfection with life cycle assessment." Water Science and Technology **69**(8): 1742-1750.

**Korrespondenz an:**

Dr.-Ing. Christian Remy

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH  
Cicerostraße 24, D-10709 Berlin

Tel.: +49 30 53653 808

Mail: [christian.remy@kompetenz-wasser.de](mailto:christian.remy@kompetenz-wasser.de)