



Potenzialanalyse zur Energieeinsparung, Steigerung der Energieeffizienz und Einsatz erneuerbarer Energien mit Entwicklung eines Zukunftskonzepts am Beispiel der Kläranlage Eversburg in Osnabrück – 2. Phase

Abschlussbericht 2. Projektphase, gefördert von
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem AZ: 30709/02



Von

Prof. Dr.-Ing. Jens Wagner, Felicitas Schönfeld B.Eng.

Fakultät Versorgungstechnik

Institut für energieoptimierte Systeme

Labor für Wasser – und Abwassertechnik

Ostfalia - Hochschule für angewandte Wissenschaften - Wolfenbüttel

Wolfenbüttel, im Juli 2015

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	ii
Abkürzungsverzeichnis	iii
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	2
2.1 Ausgangssituation und Zielsetzung	2
2.2 Kurzbeschreibung der Abwasserbehandlung	2
2.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	3
3. Darstellung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse	4
3.1 Sensitivitätsanalysen	4
3.1.1 Beschreibung des Modells	5
3.1.2 Variation von jeweils zwei Eingangswerten	7
3.1.3 Variation von jeweils drei Eingangswerten	9
3.2 CO ₂ -Bilanz und Carbon Footprint	9
3.2.1 Bilanzraum und Untersuchungsrahmen	10
3.2.2 Bilanzierung Treibhausgaspotential	15
3.2.3 Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen	18
3.3 Zukunftskonzept	20
3.3.1 Deammonifikation	20
3.3.2 Vierte Reinigungsstufe	21
3.4 Energetische Modellerstellung	24
3.4.1 Entwicklung eines Kalkulationswerkzeugs	24
3.4.2 Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen	25
3.4.2.1 Methode der kritischen Werte	25
3.4.3 Szenarienanalyse	31
4. Fazit und Ausblick	33
5. Literaturverzeichnis	35
6. Anhang	39

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schema Abwasserbehandlung Kläranlage Eversburg	3
Abb. 2: Zeitreihe Eingangsvariablen [2], [3], [4]	6
Abb. 3: Variation von Strompreisindex (SPI) und Verbraucherpreisindex (VPI)	7
Abb. 4: Variation des SPI in Abhängigkeit des VPI	8
Abb. 5: Variation des VPI in Abhängigkeit des SPI	8
Abb. 6: Variation Strompreisen(SPI) und Verbraucherpreisen (VPI) bei verschiedenen Zinssätzen	8
Abb. 7 Stärkerer Anstieg Strompreis (SPI).....	9
Abb. 8: Stärkerer Anstieg Verbraucherpreis (VPI)	9
Abb. 9: Prozessfluss Diagramm Erstellung eines Carbon Footprint	10
Abb. 10: Das „Cradle-to-grave System“.....	11
Abb. 11: Systemgrenzen und Emissionsquellen	12
Abb. 12: Sankey – Diagramm zum Treibhausgaspotential	15
Abb. 13: Ergebnisse Literaturrecherche Methanemission	16
Abb. 14: Ergebnisse Literaturrecherche Lachgasemission.....	18
Abb. 15: Entwicklung des Treibhausgaspotentials.....	19
Abb. 16: Deammonifikation und Nitrifikation/Denitrifikation	20
Abb. 17 Übersicht Verfahren Vierte Reinigungsstufe [39].....	22
Abb. 18: Schematische Darstellung Ozonierung nach [39].....	23
Abb. 19: Schematische Darstellung Dosierung Pulveraktivkohle (PAK) nach [39].....	23
Abb. 20: Änderung Strompreis Maßnahme A1 (VPI = 1,6%).....	27
Abb. 21: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme A1 (SPI = 4,3%)	27
Abb. 22: Änderung Strompreis Maßnahme A2 (VPI = 1,6%).....	28
Abb. 23: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme A1 (SPI = 4,3%)	29
Abb. 24 Fortschreibung des dt. Strommix.....	39
Abb. 25: Änderung Strompreis Maßnahme K2 (VPI = 1,6%).....	40
Abb. 26: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme K2 (SPI = 4,3%)	40
Abb. 27: Gleichzeitige Variation 3 Eingangsgrößen.....	41
Abb. 28: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.5 (VPI = 1,6%)	42
Abb. 29: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.5 (SPI = 4,3%).....	42
Abb. 30: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.6.2 (VPI = 1,6%)	43
Abb. 31: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.6.2 (SPI = 4,3%).....	43
Abb. 32: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.8 (VPI = 1,6%)	44
Abb. 33: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.8 (SPI = 4,3%).....	44
Abb. 34: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.10 (VPI = 1,6%)	45
Abb. 35: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.10 (SPI = 4,3%).....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der ermittelten Stromverbräuche	4
Tabelle 2: Schwankungsbereich Eingangsvariablen [%] innerhalb von 10 Jahren	6
Tabelle 3: Treibhausgaspotentiale.....	13
Tabelle 4: Potential der Einsparungsmaßnahmen	19
Tabelle 5: Vor- und Nachteile Vierte Reinigungsstufe [39].....	22
Tabelle 6: Kosten Vergleich Ozonierung und Pulveraktivkohle-Dosierung	24
Tabelle 7: Allgemeine, nicht variierte Eingangsdaten.....	25
Tabelle 8: Untersuchungsbereich für variable Eingangsdaten	25
Tabelle 9 Charakterisierung Maßnahmen nach Kosten-Nutzen-Verhältnis	26
Tabelle 10: Szenarienanalyse.....	32
Tabelle 11: Übersicht der im ersten Projektabschnitt ermittelten Maßnahmen.....	39
Tabelle 12: Gleichzeitige Variation 3 Eingangsgrößen.....	41
Tabelle 13: Ergebnisse Literaturstudie Methanemissionen.....	46
Tabelle 14: Ergebnisse Literaturstudie Lachgasemissionen	46
Tabelle 15: Kostenfunktionen [41]	47
Tabelle 16: CO ₂ -Emissionen [40].....	47

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BHKW	Blockheizkraftwerk
CF	Carbon Footprint
GAK	Granulierte Aktivkohle
GWP	Global Warming Potential
i.M.	Im Mittel
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K/N	Kosten–Nutzen–Verhältnis
NSHV	Niederspannungshauptverteilung
PAK	Pulveraktivkohle
VPI	Verbraucherpreisindex
SPI	Strompreisindex
THG	Treibhausgas

1. Zusammenfassung

In der ersten Projektphase wurden Energieoptimierungspotentiale der Kläranlage Eversburg ermittelt und bewertet. In dieser zweiten Phase wurden insbesondere die nicht oder noch nicht wirtschaftlichen Maßnahmen noch einmal vertieft betrachtet. Mittels einer Sensitivitätsanalyse konnten Randbedingungen ermittelt werden, unter denen eine Wirtschaftlichkeit gegeben wäre. Zur Ermittlung der ökologischen Auswirkungen der Maßnahmen wurde ein Carbon-Footprint der Anlage ermittelt. Anhand einer ökonomischen und ökologischen Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen sowie durch das Aufzeigen perspektivischer Maßnahmen und Verfahren (Vierte Reinigungsstufe) wurde ein ganzheitliches Zukunftskonzept für die Abwasserreinigung auf der Kläranlage Eversburg erstellt.

Zunächst wurden die im Rahmen der ersten Projektphase ermittelten Stromverbräuche durch detaillierte Messungen validiert und korrigiert. Anschließend wurden die bereits identifizierten Maßnahmen mittels einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet. Durch eine Variation der Eingangsparameter Strompreisindex, Verbraucherpreisindex und Zinssatz konnten jeweils Grenzwerte für eine maßgebliche Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnis bestimmt werden. Dabei ist ein deutlich über dem Verbraucherpreisindex liegender Strompreisindex bei niedrigen Zinssätzen, wie es in den letzten Jahren der Fall war, ausschlaggebend für eine bisher nicht erkannte Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

Eine ökologische Bewertung der vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahmen erfolgte über die Abschätzung des Potentials zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Dabei konnte auf Grundlage einer CO₂-Bilanz ein Carbon Footprint von ca. 40 kg CO_{2,äq}/(E*a) (10.500 t CO_{2,äq} /a) ermittelt werden. Die durch den Strombezug verursachten Emissionen liegen mit 15 kg CO_{2,äq}/(E*a) unerwartet niedrig und in ähnlichen Größenordnungen wie die direkten Emissionen (vor allem durch Methan) aus dem Kläranlagenbetrieb. Dadurch wird deutlich, dass neben der Reduktion des Treibhausgaspotentials durch Umsetzung von Energiesparmaßnahmen eine Minimierung der direkten Emissionen notwendig wäre. Unter Berücksichtigung des Umsetzungszeitpunktes und der Entwicklung des deutschen Strommix (Anteil der erneuerbaren Energien) konnte ein wirtschaftliches Einsparpotential von lediglich 3 kg CO_{2,äq}/(E*a) ermittelt werden.

Vor dem Hintergrund zukünftiger Anforderungen an die Qualität der Reinigungsleistung und Energieeffizienz der Abwasserbehandlung wurde ein Zukunftskonzept mit weiteren Maßnahmen entwickelt. So könnten durch eine Umstellung der Filtratwasserbehandlung auf Deammonifikation Betriebskosteneinsparungen von bis zu 50 % sowie eine Verringerung der Treibhausgasemissionen erzielt werden. Als Verfahren zur Minimierung von Mikroschadstoffen im Abwasser wurden oxidative und absorptive Maßnahmen identifiziert. Bei einer Abwägung zwischen einer Verwendung von Ozon oder Aktivkohle ist, trotz höherer Wirtschaftlichkeit und besserer Reinigungsleistung der Ozonierung, der Effekt des höheren Energiebedarfs zu berücksichtigen.

Es wurde ein Kalkulationswerkzeug zur Untersuchung der einzelnen Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. Dieses ermöglicht dem Anwender abzuschätzen, unter welchen Bedingungen die Umsetzung einer Maßnahme ökonomisch sinnvoll wäre und welcher Umwelteinfluss daraus resultieren würde. Eine Szenarienanalyse zeigte, dass die wirksamsten Maßnahmen (A1: Erneuerung von zwei Blockheizkraftwerken und A2: Druckbelüftung) unter den Bedingungen eines niedrigen Zinssatzes und eines auch zukünftig über der Inflationsrate steigenden Energiepreises deutlich wirtschaftlicher sind, als bisher angenommen. Der Betreiber hat durch dieses Modell die Möglichkeit die bisher nicht umgesetzten Maßnahmen regelmäßig anhand der sich verändernden individuellen Randbedingungen auf Wirtschaftlichkeit zu untersuchen und so jederzeit seine Investitionsentscheidungen ohne erneuten Planungsaufwand anzupassen.

2. Einleitung

2.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und steigender Energiepreise ist es notwendig Energieeinsparmaßnahmen und eine damit verbundene Reduktion der Treibhausgasemission zu forcieren. Dabei können Kläranlagen, welche für rund 20 % des kommunalen Strombezuges und rd. 1% des gesamten Stromverbrauchs verantwortlich sind, einen wichtigen Beitrag liefern. Vor diesem Hintergrund führen die Stadtwerke Osnabrück AG (SWO) ein Forschungsprojekt zur Erstellung einer Energieeffizienzanalyse und eines Zukunftskonzept für die Kläranlage Eversburg in Osnabrück durch. Dieses Projekt ist in zwei Abschnitte gegliedert. Im Rahmen einer ersten Projektphase (gefördert durch die DBU unter dem AZ: 30109) wurde die aktuelle Auslastung der Anlage durch das Ingenieurbüro DAHLEM ermittelt sowie eine Energiebilanz der einzelnen Verbraucher erstellt [1]. Es konnten, anhand einer Gegenüberstellung des theoretischen Idealwertes mit dem tatsächlichen Verbrauch, insgesamt in 15 verschiedenen Bereichen Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz identifiziert werden. Dabei wurde eine Einteilung in Sofortmaßnahmen, sowie in kurzfristige und abhängige Maßnahmen getroffen.

Im zweiten Projektabschnitt sollen die identifizierten Maßnahmen unter ökonomischen und insbesondere ökologischen Gesichtspunkten vertieft untersucht werden. Da die Abwasserreinigung durch verschiedene externe Randbedingungen beeinflusst wird, ergeben sich entsprechend Schwankungen für den Gesamtenergiebezug. Es ist möglich, dass die positiven Auswirkungen einiger Maßnahmen zur Effizienzsteigerung nicht unmittelbar, sondern erst langfristig sichtbar werden. Ziel der zweiten Projektphase ist es, verschiedene Randbedingungen zu identifizieren, unter denen eine Umsetzung potentieller Energieeffizienzmaßnahmen ökonomisch sinnvoll ist. Der Umwelteinfluss der identifizierten Maßnahmen soll anhand der Erstellung eines Carbon Footprint abgeschätzt werden. Weiterhin sollen verfahrenstechnische Änderungen in Bezug auf neue Konzepte, welche eine weitere Effizienzsteigerung und einer ökologischen Optimierung ermöglichen, benannt und bewertet werden. Dazu werden Verfahren wie z.B. Deammonifikation oder Verfahrenstechniken der sog. 4. Reinigungsstufe zur Entfernung refraktärer Stoffe und einer Keimreduktion betrachtet.

2.2 Kurzbeschreibung der Abwasserbehandlung

Im Folgenden wird die Abwasserbehandlung auf der Kläranlage Eversburg kurz beschrieben. Diese wurde im Jahr 1914 erbaut, mehrfach erweitert und umgebaut und besitzt derzeit eine Ausbaugröße von 250.000 EW. Die Belastung im Betrachtungszeitraum lag i.M. bei 269.400 EW_{CSB}.

Das zulaufende Schmutzwasser gelangt über das Zulaufpumpwerk in die mechanische Reinigung. Dort durchläuft es eine Rechenanlage sowie einen belüfteten Sand- und Fettfang. Im Vorklärbecken wird der Primärschlamm (PS) abgezogen. Anschließend wird das vorgereinigte Abwasser in die biologische Reinigungsstufe gepumpt. Diese besteht aus einer Rücklaufschlamm-Denitrifikation (anoxisch), Becken zur biologischen Phosphatelimination (Bio-P), sowie Belebungsbecken mit intermittierender Belüftung mittels Walzenbelüftern. Nach dem Durchfließen des Nachklärbeckens gelangt das vom Belebtschlamm abgetrennte und gereinigte Abwasser über Schönungsteiche in den Vorfluter Hase. Der Überschussschlamm (ÜS) aus der biologischen Stufe wird eingedickt und anschließend gemeinsam mit dem Primärschlamm und evtl. anfallenden Fremdschlämmen in der Faulung anaerob stabilisiert. Im Zuge der Faulung entsteht methanhaltiges Faulgas, welches anschließend mittels Blockheizkraftwerke (BHKW) zur Eigenenergieerzeugung genutzt wird. Der im Zuge der Faulung anaerob stabilisierte Schlamm wird

konditioniert und entwässert, um anschließend landwirtschaftlich verwertet zu werden. Sowohl bei der Überschussschlammeindickung, als auch im Zuge der Schlammmentwässerung entsteht Filtratwasser. Während das Filtratwasser aus der Eindickung dem Prozess wieder zugeführt wird, erfolgt für das Abwasser aus der Schlammmentwässerung eine separate Behandlung.

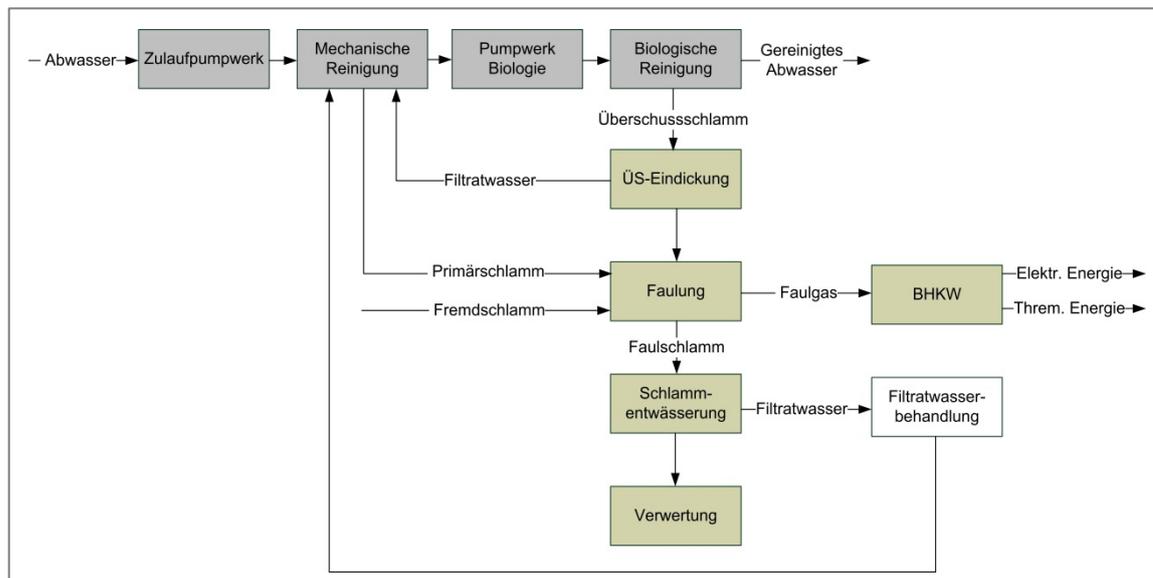


Abb. 1: Schema Abwasserbehandlung Kläranlage Eversburg

2.3 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

In der zweiten Projektphase erfolgte zunächst eine Validierung, der für die Energieeffizienzanalyse ermittelten Stromverbräuche, wie auch im Bewilligungsbescheid als Bewilligungsaufgabe erteilt. Anschließend wurden die bereits identifizierten Maßnahmen mittels einer Sensitivitätsanalyse bewertet, wobei insbesondere die Wirtschaftlichkeit der abhängigen Maßnahmen betrachtet wird. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss von schwankenden Parametern wie dem Strompreis, der Inflationsrate und dem Zinssatz hinsichtlich der Rentabilität der Maßnahmen untersucht. Weiterhin erfolgte eine Bewertung der Maßnahmen unter ökologischen Aspekten. Dazu wurde auf Grundlage einer CO₂-Bilanz zunächst der Carbon Footprint der Kläranlage bestimmt. Dieser berücksichtigt nicht nur die Treibhausgasemissionen, welche durch den Energiebezug verursacht werden, sondern auch jene, welche während der gesamten Abwasserreinigung entlang des Lebenszyklus der Kläranlage entstehen. Die Ermittlung des Carbon Footprint orientierte sich an der ISO/TS 14067:2013 2014. In einem weiteren Schritt werden die einzelnen Einsparungsmaßnahmen hinsichtlich ihres Potentials zur Minderung von Treibhausgasemissionen untersucht. Dabei wurde auch der Zeitpunkt der Umsetzung berücksichtigt.

Im Hinblick auf zukünftige Anforderungen an die Abwasserreinigung erfolgte eine Zusammenstellung und Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Hierbei wurden Verfahren wie z.B. Deammonifikation oder Verfahrenstechniken zur Entfernung refraktärer Stoffe und Keimreduktion (4. Reinigungsstufe) betrachtet.

Auf Grundlage dieser Sensitivitätsanalyse wurde ein Kalkulationswerkzeug entwickelt, welches dem Anwender aufzeigt, unter welchen Bedingungen ein für die jeweilige Maßnahme günstiges Kosten–Nutzen–Verhältnis erreicht wird. Dabei wurden jeweils kritische Werte für eine Veränderung des Strompreisindex (SPI), des Verbraucherpreisindex (VPI) und des Zinssatzes ermittelt, welche beschreiben, wann z.B. eine Maßnahme als wirtschaftlich einzustufen ist.

3. Darstellung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird die Durchführung einzelnen Arbeitspakete erläutert und die Ergebnisse vorgestellt. Zunächst wurde eine Validierung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Stromverbräuche durchgeführt. So konnte die notwendige Grundlage für die anschließende Sensitivitätsanalyse geschaffen werden. Dort wurde die Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von der Variation einiger Eingangsparameter wie Strompreisindex (SPI), Verbraucherpreisindex (VPI) und Zinssatz aufgezeigt. Weiterhin erfolgte eine ökologische Bewertung der ermittelten Energieeffizienzmaßnahmen anhand einer CO₂-Bilanz und der Bestimmung des Carbon Footprint. Auf eine Zusammenstellung potentieller Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung in einem Zukunftskonzept folgte schließlich eine energetische Modellerstellung. Diese wurde dazu genutzt, die Energieeffizienzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und vor dem Hintergrund verschiedener, veränderlichen ökonomischen Randbedingungen zu beleuchten.

Überprüfung der ermittelten Stromverbräuche

In einem ersten Schritt wurden die im ersten Projektabschnitt [1] ermittelten Stromverbräuche überprüft und mit Messungen, die aus den Betriebsdaten des Betriebsführungssystem entnommen wurden, abgeglichen und ergänzt. Damit wurde einerseits eine Bewilligungsaufgabe des Mittelgebers abgearbeitet, andererseits war dies auch nötig, um für die nachfolgenden Untersuchungen verlässliche Eingangswerte für den jeweiligen Stromverbrauch der betrachteten Maßnahmen zu generieren. In [1] konnte für die gesamte Anlage ein Elektrizitätsbezug von 8.904 MWh im Bezugsjahr 2011 ermittelt werden. Davon wurden 8.546 MWh/a (96 %) den einzelnen Verbraucher zugeordnet.

Im Zuge der Validierung konnten die zuvor bestimmten Stromverbräuche überwiegend bestätigt werden. Insbesondere im Bereich der Biologie, dem stromintensivsten Hauptaggregat, konnte nur eine geringe Abweichung verzeichnet werden, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist. Bei den Abweichungen der Daten ist auch der Einfluss einer z.T. unvollständigen Datenaufzeichnung und einer damit verbundenen Unsicherheit zu berücksichtigen.

	1. Projektphase [1]		2. Projektphase		Abweichung [%]
	Verbrauch [MWh/a]	Anteil am ges. Verbrauch [%]	Verbrauch [MWh/a]	Anteil am ges. Verbrauch [%]	
Vorreinigung	1.015	11,40	1.108	12,45	8,41
Biologie	4.979	55,92	5.049	56,70	1,38
N-Anlage	467	5,24	567	6,37	17,66
SBH	837	9,40	770	8,64	-8,75

Tabelle 1: Vergleich der ermittelten Stromverbräuche

Mittels der im Rahmen der zweiten Projektphase validierten Daten wurden dann die folgenden Untersuchungen durchgeführt.

3.1 Sensitivitätsanalysen

Anhand einer Sensitivitätsanalyse wurde eine Zielgröße auf ihre Empfindlichkeit gegenüber einer Variation von Eingangsparametern untersucht. Im ersten Abschnitt wurden zunächst grundlegende Charakteristika dieser Größen dargestellt. Anschließend wird der Einfluss der unterschiedlichen Entwicklung der jeweiligen Parameter erläutert.

3.1.1 Beschreibung des Modells

Der Kosten-Nutzen-Analyse der identifizierten Einsparmaßnahmen wurden Parameter zu Grunde gelegt, welche durch Schwankungen und Unsicherheiten gekennzeichnet sind. Durch eine Abschätzung der Empfindlichkeit des Kosten–Nutzen–Verhältnisses, also der entscheidungsrelevanten Kenngröße, ist es möglich, diese Unsicherheiten zu reduzieren und ggf. eine Empfehlung hinsichtlich der Umsetzung mit höherer Genauigkeit oder zu mindestens in besserer Kenntnis der Risiken und Unwägbarkeiten zu treffen.

Im Folgenden werden die verwendeten Faktoren zur Änderung des Verbraucherpreisindex (VPI), des Strompreisindex (SPI) sowie des Leitzins der europäischen Zentralbank näher erläutert. Eine Variation der Nutzungsdauer wird nicht näher betrachtet. Durch die Betrachtung einer Zeitreihe der Eingangsgrößen ist es möglich, einen groben Untersuchungsrahmen festzulegen. Die Zeitreihe wurde auf Grundlage von Daten der Deutschen Bundesbank [2] und vom statistischen Bundesamt [3], [4] ermittelt. Die Indizes für den Verbraucherpreis (VPI) und Strompreis (SPI) beschreiben eine Preisänderung in Bezug auf das Basisjahr 2010, wobei dieses im Zuge der Sensitivitätsanalyse aktualisiert wird. Damit wird ein Vergleich der Preise, welcher die dahinterstehende Kaufkraft berücksichtigt, gemäß dem Prinzip der Realbewertung ermöglicht. Auf Grundlage der bisherigen Entwicklung kann ein grober Variationsbereich der Eingangsparameter für die Untersuchung der einzelnen Einsparungsmaßnahmen bestimmt werden. Wie der Zeitreihe zu entnehmen ist, sind der Preisindex für verfahrenstechnische Maschinen & Apparate und der Verbraucherpreisindex (VPI) durch eine ähnliche historische Entwicklung gekennzeichnet. Daher kann der Verbrauchpreisindex (VPI) als Faktor für die Entwicklung der Investitions- und Betriebskosten verwendet werden. Die Höhe des für eine Investition anzusetzenden Zinses kann anhand des Leitzinses der Europäischen Zentralbank (EZB) abgeschätzt werden. Der EURIBOR (Euro Interbank Offered Rate), welcher für die Bildung des Zinssatzes relevant ist, orientiert sich am EZB - Leitzins.

Für die Indizes für den Verbraucherpreis (VPI) und den Strompreis (SPI) ist ein konstanter Anstieg zu beobachten. Die Änderung der Indizes verlief in der Vergangenheit unterschiedlich stark und zeitweise schwankend. Obwohl der Strompreisindex (SPI) in jüngster Zeit keine starke Änderung erkennen ließ, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass dieser mittel- bis langfristig über dem VPI liegen wird, wie dies auch in der Vergangenheit der Fall war. Der Strompreisindex (SPI) hat sich in der Vergangenheit jedoch deutlich vom Verbrauchpreisindex (VPI) abgekoppelt. Während der Verbrauchpreisindex (VPI) und der Zinssatz einen direkten Einfluss auf die Jahreskosten ausüben, wirkt sich der Strompreisindex (SPI) unmittelbar auf den Jahresnutzen aus. So kann durch eine Variation dieser Eingangsparameter eine Verschiebung des Kosten–Nutzen–Verhältnisses erfolgen.

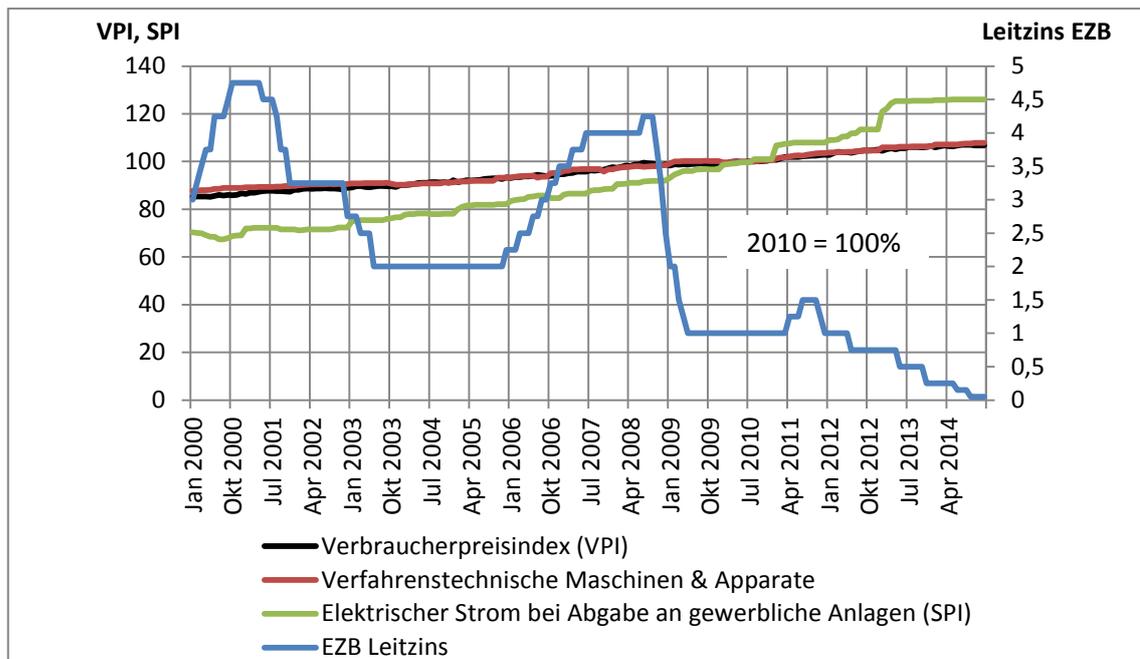


Abb. 2: Zeitreihe Eingangsvariablen [2], [3], [4]

Da für die Wirtschaftlichkeitsberechnung gemäß der Angaben der Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) eine Nutzungsdauer von 10 Jahren verwendet wird, erfolgt ein Bezug aller Veränderungen auf dieses Intervall [44]. Innerhalb des Zeitfensters konnte weder eine Deflation noch eine Abnahme des Strompreises verzeichnet werden. Eine Verringerung der Stromkosten ist dabei nicht kategorisch auszuschließen, jedoch über einen mehrjährigen Zeitraum noch nie vorgekommen. Für die Modellbetrachtung wird die Annahme getroffen, dass die Änderung des Preisanstieges im Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Daher wurden jeweils Mittelwerte über 10 Jahre gebildet. Ein Vergleich liefert folgende Schwankungsbreiten der Eingangsvariablen.

Parameter	Max. Änderung	Min. Änderung	Durchschnittlich
VPI	1,67 % p.a.	1,43 % p.a.	1,55 % p.a.
SPI	5,06% p.a.	3,38 % p.a.	4,32 % p.a.

Tabelle 2: Schwankungsbereich Eingangsvariablen [%] innerhalb von 10 Jahren

Der von der EZB vorgegebene Zinssatz lag innerhalb eines Zeitraumes von 10 Jahren zwischen 0,05 % und 4,8 %.

Die Sensitivität gegenüber weiteren Betriebskosten wurden nicht weiter untersucht. Die weiteren Betriebskosten sind zum Großteil den aufzuwendenden Gehältern zuzuschreiben. Da der Reallohnindex in der Vergangenheit fast keinen Schwankungen im Vergleich zum VPI unterlegen war, kann den Lohnkosten und damit auch den weiteren Betriebskosten kein entscheidendes Potential zur Beeinflussung des Kosten–Nutzen–Verhältnisses beigemessen werden.

Bevor eine Analyse der einzelnen Maßnahmen erfolgte, wurde eine grundlegende Sensitivitätsanalyse der Eingabeparameter durchgeführt. So konnte eine erste Einschätzung hinsichtlich des Einflusspotentials der Eingangsparameter getroffen werden. Grundsätzlich ist bei der Untersuchung der Empfindlichkeit des Kosten–Nutzen–Verhältnisses von Energieeinsparmaßnahmen zwischen einer singulären (eindimensionalen) und eine multiplen (mehrdimensionalen) Variation der Eingangsparameter zu unterscheiden. Während bei einer singulären Variation nur eine Größe verändert und die übrigen konstant behandelt werden, erfolgt bei einer multiplen Untersuchung einer gleichzeitigen Variation von mehreren Faktoren. Während eine Veränderung des Verbraucherpreises (VPI) eine unmittelbare Auswirkung auf die Jahreskosten besitzt,

wird der Jahresnutzen zum größten Teil durch die Veränderung des Strompreises (SPI) beeinflusst.

Da eine singuläre Variation als unwahrscheinlich einzuschätzen ist, wurde diese im Folgenden nicht näher betrachtet. Es wurden zunächst nur zwei Eingangsgrößen variiert und ein Parameter als konstant betrachtet, um das Zusammenwirken verschiedener Parameter darzustellen. Von besonderem Interesse ist die Untersuchung einer unterschiedlich starken Entwicklung des Strom- und Verbraucherpreises. Da in der Realität davon ausgegangen werden kann, dass sich alle Eingangsgrößen verändern, ist v.a. die Sensitivität des Kosten–Nutzen–Verhältnisses einer gleichzeitigen Variation der drei Eingangsgrößen (VPI, SPI und Zinssatz) von Bedeutung. Bei der anschließenden Betrachtung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Energieeffizienzmaßnahmen hinsichtlich verschiedener Szenarien wurden daher drei veränderliche Faktoren betrachtet. Obwohl eine stärkere Veränderung des VPI im Hinblick auf die bisherige historische Entwicklung als unwahrscheinlich anzusehen ist, sollte diese Variante dennoch Bestandteil der allgemeinen Betrachtungsweise sein, um grundlegende Zusammenhänge darzustellen. So wurde eine starke Zunahme des VPI z.B. bei der Erstellung von Worst-Case-Szenarien berücksichtigt [5].

Da die Eingangsgrößen mit gewissen Schwankungen behaftet sind, ist es äußerst wichtig mehr oder weniger wahrscheinliche, aber dennoch grundsätzlich realistische Szenarien abzubilden. Dieser Aspekt wird in den nachfolgenden multiplen Sensitivitätsanalysen berücksichtigt.

3.1.2 Variation von jeweils zwei Eingangswerten

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss einer Variation von zwei Eingangsparametern auf die Wirtschaftlichkeit einer Energieeffizienzanalyse erläutert. Dazu wurde zunächst eine Veränderung der Preisindizes betrachtet (Abb. 3).

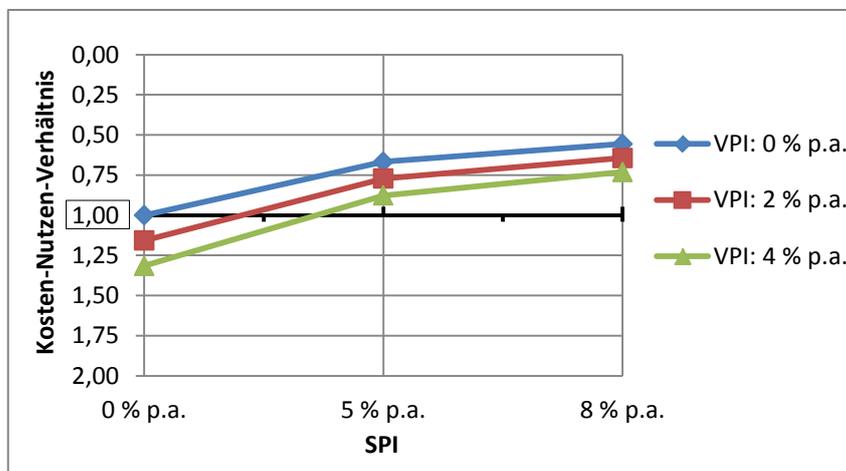


Abb. 3: Variation von Strompreisindex (SPI) und Verbraucherpreisindex (VPI)

Eine Variation von VPI und SPI liefert eine Kurve, welche dem Verlauf einer singulären Variation des VPI ähnelt. Dies lässt eine erhöhte Sensitivität gegenüber dem SPI vermuten. Es ist zu beobachten, dass mit Zunahme des SPI eine Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses erfolgt. Das günstigste Verhältnis kann erreicht werden, wenn der SPI einen möglichst hohen und der VPI einen möglichst geringen Wert annimmt, also eine möglichst große Differenz „SPI - VPI“ vorliegt. Da eine Veränderung der Eingangsparameter um den gleichen Wert als unrealistisch anzunehmen ist, soll nachfolgend ausschließlich eine unterschiedlich starke Veränderung von SPI und VPI betrachtet werden, wie sie z.B. in Abb. 4 und 5 zu finden ist.

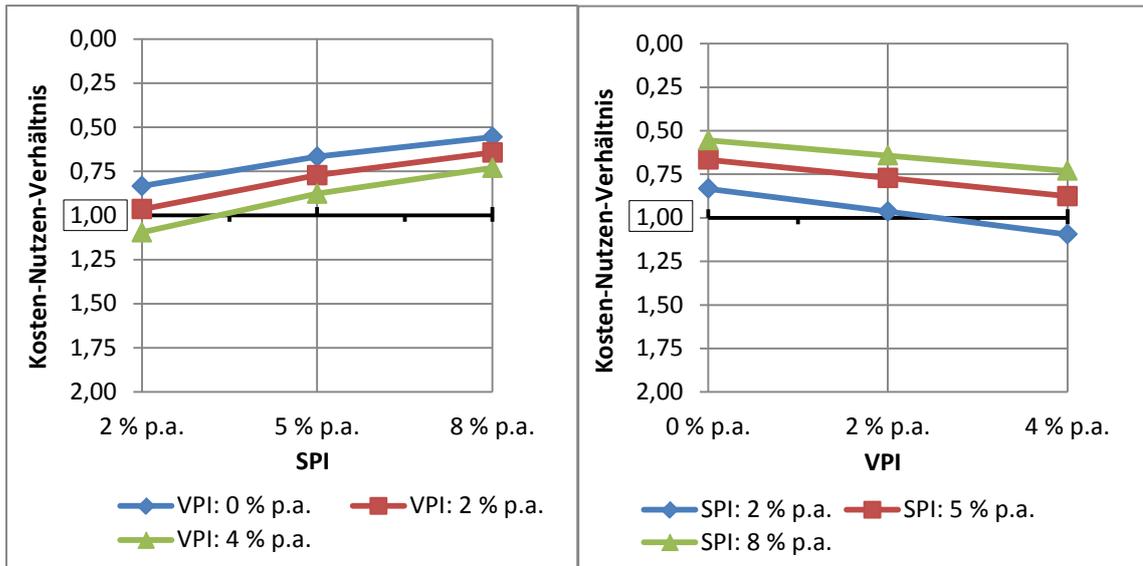


Abb. 5: Variation des VPI in Abhängigkeit des SPI

Abb. 4: Variation des SPI in Abhängigkeit des VPI

Ist die Differenz „SPI - VPI“ positiv, erfolgt ein stärkerer Anstieg des SPI. Bei einem Anstieg des SPI um 5 % p.a. und Erhöhung des VPI um 2 % p.a. kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis um 23 % auf 0,77 verringert werden. Wenn nun allerdings der SPI um 2 % p.a. und der VPI um 5 % p.a. ansteigen würde, müsste mit einer Verschlechterung des Verhältnisses um ca. 16 % auf 1,16 gerechnet werden. Die Tatsache, dass bei gleicher Differenz für einen stärkeren Anstieg des SPI ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegt, zeigt, dass nicht nur die Differenz sondern auch die Höhe der Preisindizes einen gewissen Einfluss besitzt. Je größer die Differenz zwischen SPI und VPI, desto besser ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis. So kann auch für eine stärkere Veränderung des VPI eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden, sofern die Differenz ausreichend groß ist.

Nachdem der Zusammenhang von SPI und VPI vorgestellt wurde, soll im Folgenden jeweils eine Veränderung dieser Faktoren in Kombination mit verschiedenen Zinssätzen dargestellt werden. Wie Abb. 6 zu entnehmen ist, ist das Kosten-Nutzen-Verhältnisses jeweils für geringere Zinssätze günstiger.

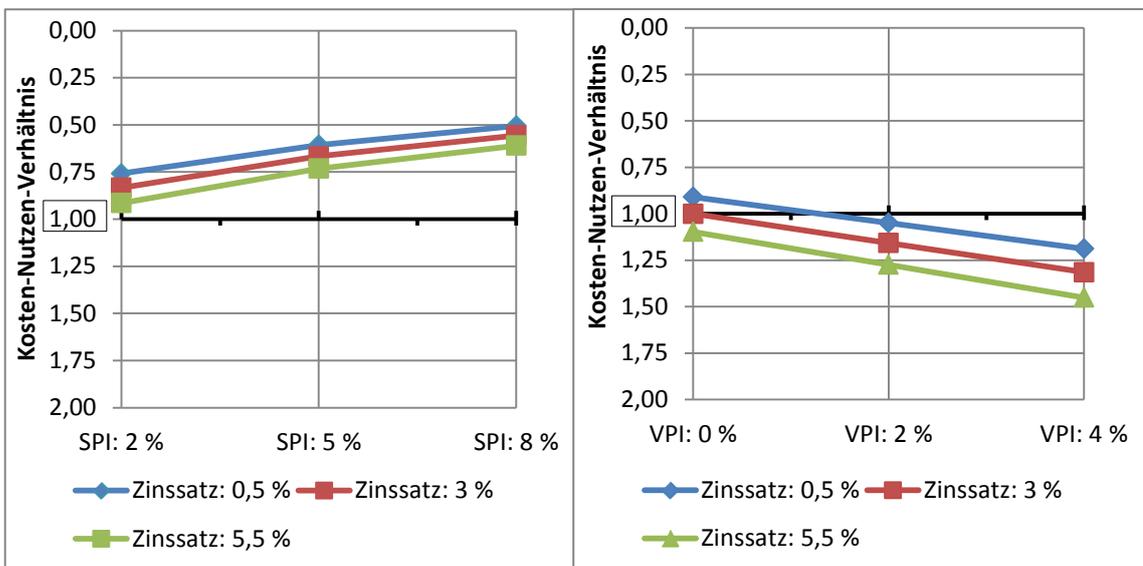


Abb. 6: Variation Strompreisen(SPI) und Verbraucherpreisen (VPI) bei verschiedenen Zinssätzen

3.1.3 Variation von jeweils drei Eingangswerten

Eine Variation aller Parameter in unterschiedlich großen Bereichen ermöglicht eine bessere Annäherung an realistische Verhältnisse als eine singuläre Analyse, da so verschiedenen Kombinationen berücksichtigt werden. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis zeigt gegenüber einer Variation des VPI eine höhere Empfindlichkeit, sofern eine Abnahme der Eingangsparameter erfolgt. Eine zusätzliche Variation des Zinssatzes bewirkt lediglich ein Verschieben der Kurven parallel zur Abszisse. Würde also kein Unterschied zwischen der Entwicklung des VPI und des SPI bestehen, hätte lediglich eine Veränderung des Zinssatzes Einfluss auf die Zielgröße. Daher wird bei den folgenden Betrachtungen jeweils immer eine Differenz der Preisindizes berücksichtigt. Wie den Abbildungen 7 und 8 zu entnehmen ist, wurden in Abhängigkeit des Zinssatzes verschiedenen Kombinationen des Strompreises (SPI) und des Verbraucherpreises (VPI) betrachtet. Dabei wird in Abb. 7 ein gegenüber dem VPI stärker ansteigender SPI dargestellt. Die Abb. 8. zeigt einen stärkeren Anstieg des Verbraucherpreises.

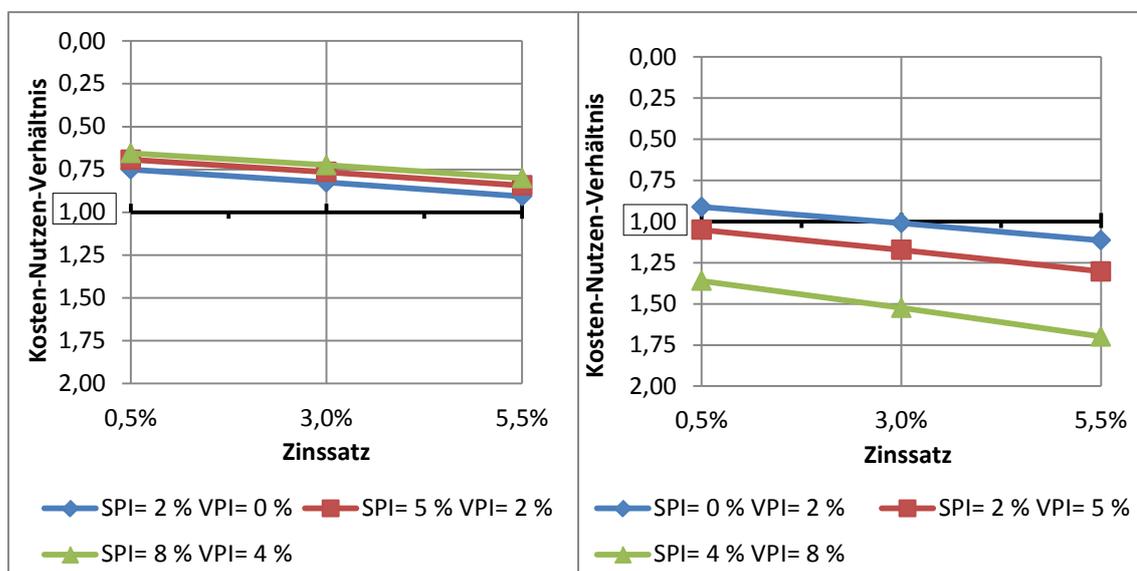


Abb. 8 Stärkerer Anstieg Strompreis (SPI)

Abb. 7: Stärkerer Anstieg Verbraucherpreis (VPI)

Während für einen stärkeren Anstieg des SPI immer ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht wird, ist bei einem stärkeren Anstieg des VPI generell mit einer Verschlechterung zu rechnen. Wenn sich der SPI stärker ändert als der VPI, ist die Steigung der Geraden geringer als bei einem stärkeren Anstieg des VPI. Diese kann mit dem Ausgleich des VPI und Zinssatzes durch den Einfluss höherer SPI erklärt werden. Weiterhin ist zu bemerken, dass der Abstand zwischen den Kurven stärker mit steigender Differenz zwischen VPI und SPI zunimmt.

3.2 CO₂-Bilanz und Carbon Footprint

Eine emissionsarme Abwasserbehandlung kann einen wichtigen Beitrag zum Erreichen des Zieles der Nationalen Klimaschutzinitiative liefern und helfen die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 zu senken. Um das Einsparungspotential von Kläranlagen untersuchen zu können, wird der sog. Carbon Footprint einer Kläranlage bestimmt. Während der Einfluss von Treibhausgasemissionen aus Kraftwerken oder Fahrzeugen auf das Klima hinlänglich bekannt ist, steht die Untersuchung von Kläranlagen erst am Anfang. Der Carbon Footprint beschreibt die „Summe der Treibhausgasemissionen und des Treibhausgasentzugs [...] angegeben als CO₂-Äquivalent“ [6]. Um eine ganzheitliche Bilanzierung zu erreichen, wird dabei der gesamte Lebenszyklus eines Produktes bzw. Prozesses betrachtet. Eine CO₂-Bilanz und die damit verbundene Zusammenstellung der relevanten Treibhausgasemissio-

nen in Form eines Carbon Footprint liefern die nötigen Grundlagen für eine Einschätzung des Einsparungspotentials der vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahmen.

Die Erstellung einer CO₂ - Bilanz und des Carbon Footprint für die Kläranlage Eversburg orientiert sich an den Vorgaben der „Technische Spezifikation zum Carbon Footprint von Produkten“ [6] und wird durch den „Product life cycle accounting and reporting standard“ [7] und die „2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories“ [8] ergänzt. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Carbon Footprint wird durch folgendes Prozessflussdiagramm verdeutlicht:

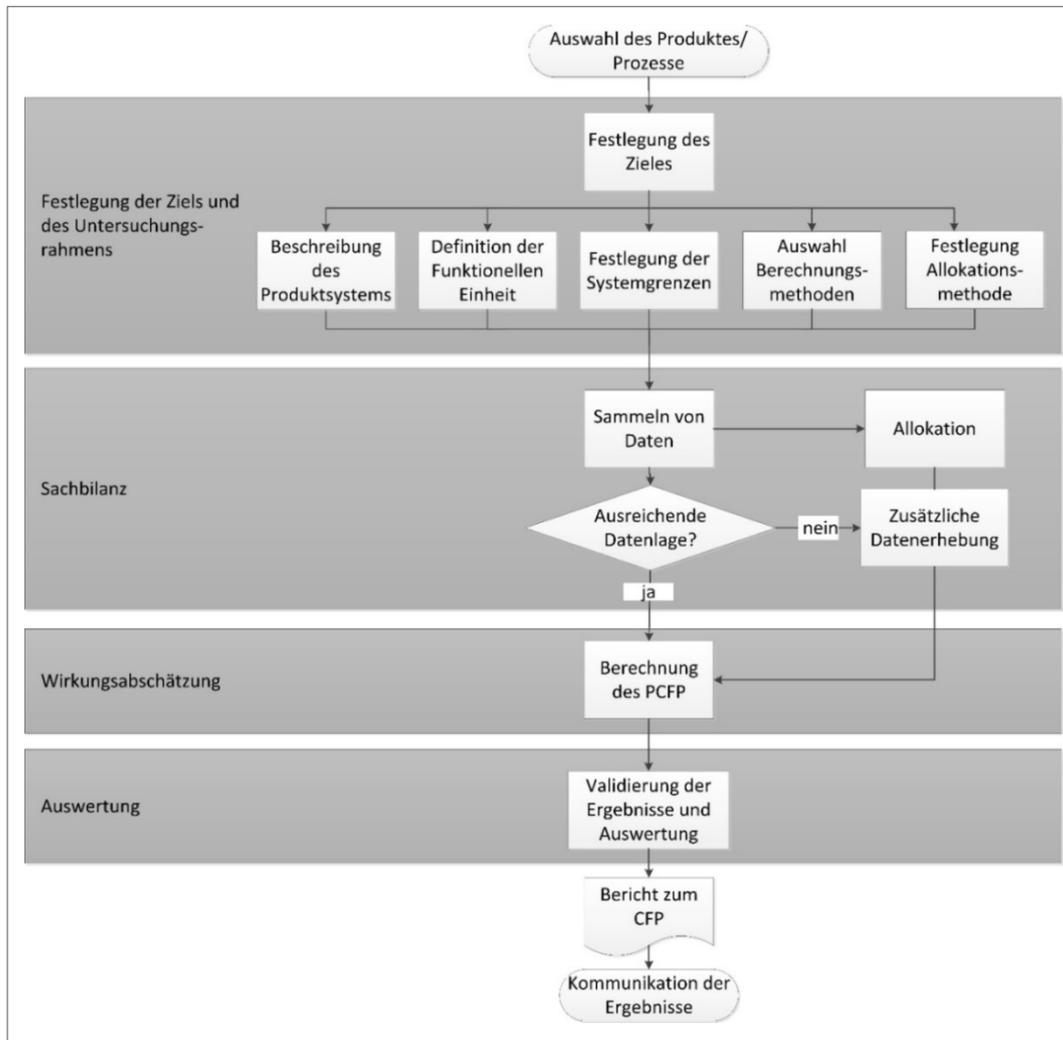


Abb. 9: Prozessfluss Diagramm Erstellung eines Carbon Footprint

Zunächst werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Das Ziel der Untersuchung des Carbon Footprint ist eine ökologische Bewertung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Energieeinsparmaßnahmen auf Grundlage einer Bestandsaufnahme der durch die Abwasserreinigung entstandenen Treibhausgase. Als funktionelle Einheit wird der Einwohnerwert verwendet. Auf diesen Wert werden alle relevanten Daten wie Ein- und Ausgangsströme der Wirkungsbilanz bezogen. Unter Berücksichtigung der Daten eines Jahres wird der Carbon Footprint in kg CO_{2,Äq}/(EW*a) angegeben. Die Umweltauswirkungen der Abwasserreinigung werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung dargestellt. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse validiert und ausgewertet. Eine detailliertere Beschreibung der Vorgehensweise ist in einer Abschlussarbeit [9] zu finden, welche im Rahmen dieses Projektes verfasst wurde.

3.2.1 Bilanzraum und Untersuchungsrahmen

Bei der Definition des Bilanzraumes wird zunächst zwischen zeitlichen und betriebsbedingten Grenzen unterschieden. Die zeitliche Betrachtung des Carbon Footprint deckt den gesamten

Lebenszyklus der Kläranlage Eversburg ab. Dabei werden nach dem sog. „Cradle-to-grave System“, wie in Abb. 10 gezeigt, sowohl die Bauphase, als auch die Nutzungsphase und die Rückbauphase betrachtet. Der Fokus soll jedoch auf der Nutzungsphase liegen, da diese bei Kläranlagen normalerweise sehr lang ist und daher die weiteren Phase im Vergleich vernachlässigbar gering.



Abb. 10: Das „Cradle-to-grave System“

Das ermittelte Treibhausgaspotential der Emissionen aus der Nutzungsphase bezieht sich auf das Jahr 2011. Das Treibhausgaspotential („Global Warming Potential - GWP“) für die Emission von N_2O , CH_4 und CO_2 wurde, wie in der Literatur üblich, für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ausgewählt. Für die Emissionen aus der Bau- und Nutzungsphase wird in Anlehnung an eine Arbeit von Schmuck [10] ebenfalls ein Betrachtungszeitraum von 100 Jahren gewählt. Dabei wurde eine Abschreibung der Emissionen über den Betrachtungszeitraum sowie die durch die unterschiedlichen Nutzungsdauern der einzelnen Anlagenteile bedingten Erneuerungszyklen berücksichtigt. Das so ermittelte Treibhausgaspotential der Bau- und Rückbauphase kann damit auf die Bilanzierung des Jahres 2011 angewandt werden. Für die Szenariobetrachtung der Entwicklung der Gesamtemissionen wird ein Zeitraum von 20 Jahren ausgewählt. Dieser kürzere Betrachtungszeitraum ergibt sich aus der linearen Fortschreibung des Strommixes in Deutschland. Da der aktuelle Trend lediglich fortgeschrieben wird, ist mit zunehmendem Betrachtungszeitraum von einer höheren Unsicherheit der Werte auszugehen. Um ein aussagekräftigeres Ergebnis zu erzielen, wird also eine kürzere, aber signifikantere Zeitspanne ausgewählt.

Im Rahmen der Definition von betriebsbedingten Grenzen wurde festgelegt, dass weder die Emissionen aus der Abwasserableitung, noch die Emissionen der Filtratwasser- oder der Sickerwasserbehandlung für die Ermittlung des Carbon Footprint berücksichtigt werden. Soll über die Abwasserreinigung hinaus auch noch die Entsorgung von Reststoffen, Kraftstoffverbrauch durch Transporte und Eigenenergieerzeugung betrachtet werden, muss die Systemgrenze erweitert werden. Die Eigenenergieerzeugung und deren Nutzung im Prozess werden mittels Allokation gesondert betrachtet.

Zur Quelle der direkten Emissionen gehören CH_4 , CO_2 und Lachgas. Die CO -Emissionen aus der biologischen Reinigungsstufe werden nicht mit in die Bestimmung des Carbon Footprint aufgenommen, da die Bilanzierung dieser Emissionen in der Literatur sehr umstritten ist [10]. Das Treibhausgas N_2O wird in der Belebungsstufe gebildet. Die direkten CH_4 -Emissionen werden durch biologische Abbauprozesse in Ablagerungen des Kanalnetzes, des Vorklärbeckens, während der biologischen Reinigung und in den Schlamm-speicher- und Eindickbehältern sowie weiteren Anlagenteilen der anaeroben Schlammstabilisierung gebildet [11]. Die Emissionen durch das gebildete Faulgas werden unter dem Aspekt der Bilanzierung der Eigenenergieerzeugung betrachtet. Die Verursachung von direkten CH_4 -Emissionen durch den Methanschluß des BHKW-Motors wird gesondert bilanziert. Da im Betrachtungszeitraum kein Betrieb der Notfackel erfolgte, kann auf eine Betrachtung der dort entstehenden Emissionen verzichtet werden. Die indirekten Emissionen entstehen durch die Nutzung von Fremdstrom bzw. Fremdwärme. Die dabei verwendeten Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes berücksichtigen auch de-

welche dem Prozess direkt entnommen werden, zurückgegriffen. Bei der Untersuchung der Bau- und Rückbauphase werden zusätzlich Sekundärdaten von Referenzprozessen aus der Literatur genutzt. Zur Bestimmung des Treibhausgaspotentials werden die Prozessdaten mit Emissionsfaktoren versehen. Diese werden Datenbanken, Studien und anderen weiteren Quellen wie z.B. Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes entnommen.

Bei der Bestimmung der direkten Treibhausgasemissionen von Methan und Lachgas erfolgt zusätzlich eine Umrechnung der mit Emissionsfaktoren versehenen Betriebsdaten in sog. CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq). Dazu werden die vom Weltklimarat (IPCC) veröffentlichten Treibhausgaspotentiale verwendet (Tabelle 3). Diese werden auf den Referenzwert von Kohlenstoffdioxid bezogen und als „Global Warming Potential - GWP₁₀₀“, angegeben. Dabei beschreibt der jeweilige Wert den Beitrag eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt für einen Zeithorizont von 100 Jahren. Die Höhe ist abhängig von der jeweiligen Verweilzeit.

Substanz	Chemische Formel	Mittlere Verweilzeit [a]	GWP ₁₀₀ [14]
Kohlenstoffdioxid	CO ₂		1
Methan	CH ₄	12,4	28
Lachgas	N ₂ O	121	265

Tabelle 3: Treibhausgaspotentiale

Datengrundlage für Bestimmung der direkten Emissionen

Die direkten Emissionen werden auf Grundlage einer Literaturrecherche ermittelt. Dabei können drei verschiedene Herangehensweisen unterschieden werden. Einerseits besteht die Möglichkeit nach Angaben des Weltklimarates (IPCC) vorzugehen. Allerdings werden bei dieser Methode Faktoren mit hohen Unsicherheiten verwendet und keine Methanemissionen aus dem Belebungsbecken berücksichtigt. Andererseits können Emissionswerten aus der Literatur übernommen werden. Da so jedoch keine anlagenspezifischen Emissionen abbildet werden, ist eine genaue Darstellung der Umweltauswirkung ausgeschlossen. Für die Bilanzierung der Emissionen wurden Faktoren ausgewählt, welche anhand von Angaben aus der Literatur ausgewählt werden und zusätzlich die Aktivitätsdaten der Kläranlage berücksichtigen. Damit kann eine genauere Darstellung der direkten Emissionen erreicht werden.

Als Aktivitätsdaten für die Methanemissionen werden die CSB-Frachten im Zulauf der Kläranlage verwendet. Der Emissionsfaktor beschreibt die CH₄-Bildung pro kg CSB. Die Vorgehensweise bei der Bestimmung des Emissionsfaktors orientiert sich an den Angaben von Pinnekamp et al. [11]. Es wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 5 % der CSB-Fracht unkontrolliert als Methan emittiert wird. Als Methanertrag aus dieser Fracht werden $0,32 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{kg CSB}}$ angenommen. Mit einer Normdichte von $0,72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{N}}$ [15] ergibt sich folgender Emissionsfaktor:

$$\text{EF} = 0,005 \cdot 0,32 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{kg CSB}} \cdot 0,72 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{m}^3 \text{N}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 11,52 \frac{\text{gCH}_4}{\text{kg CSB}}$$

Für die Bestimmung der Emissionen durch den Methanschluß der BHKW-Motoren kann einerseits ein Emissionsfaktor verwendet werden, welcher sich auf die produzierte elektrische Energie bezieht. Andererseits besteht die Möglichkeit, die Emissionen über einen Faktor zu ermitteln, welcher den Verlustanteil des Input an CH₄ beschreibt. In diesem Fall erfolgt die Berechnung auf folgende Weise:

$$\text{Methanschlupf} = \frac{\dot{V}_{\text{Gas}} \cdot \rho_{\text{N,CH}_4} \cdot \%_{\text{CH}_4\text{-Anteil}} \cdot \%_{\text{Methanschlupf}}}{\text{EGW}_{\text{CSB}}}$$

Mit:

$$\dot{V}_{\text{Gas}} = \text{Produziertes Faulgas} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right]$$

$$\rho_{\text{N,CH}_4} = \text{Normdichte Methan} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}_\text{N}^3} \right]$$

$\%_{\text{CH}_4\text{-Anteil}}$ = Methangehalt im Faulgas

$\%_{\text{Methanschlupf}}$ = Anteil Methanverlust (Literaturwert)

EGW_{CSB} = Auf Zulauf – CSB bezogener spezifischer Einwohnergleichwert

Bestimmung der direkten Emissionen

Für die Bilanzierung der Lachgasemissionen wurde der Faktor von Wicht [16] in Verbindung mit der Nutzung von Aktivitätsdaten ausgewählt. Als Aktivitätswert wird die Stickstoffbelastung im Ablauf der Vorklärung verwendet. In der Literatur wird der Emissionsfaktor allerdings auf die Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlage bezogen. Da nur die Emissionen aus der biologischen Reinigung betrachtet werden, ist eine Verwendung der Stickstofffracht im Ablauf der Vorklärung vertretbar. Der in der Literaturquelle ermittelte Faktor von 0,6 % $\text{N}_2\text{O}/\text{kg N}$ wurde auf Grundlage einer Untersuchung von 25 großtechnischen Kläranlagen ermittelt und bildet deren Durchschnitt ab. Unter Berücksichtigung der spezifischen Stickstofffracht der Kläranlage Eversburg ergibt sich eine Lachgasemission von rd. 16 g $\text{N}_2\text{O}/(\text{E} \cdot \text{a})$. Von den untersuchten Anlagen wurden 20 % mit intermittierender und 28 % mit simultaner Denitrifikation betrieben. Da die für die Kläranlage Eversburg angestrebte intermittierende Denitrifikation z.T. simultan betrieben wird und der Durchschnittswert der Anlagen gleichzeitig die Lachgasbildung im Zuge einer simultanen Denitrifikation abbildet, wird dieser Faktor ausgewählt.

Bestimmung der indirekten Emissionen

Die Berechnungen der Emissionen bzw. Gutschriften aus der Eigenenergieerzeugung erfolgen über eine Allokation, d.h. die Zuordnung von Emissionen zur eigentlichen Quelle, gemäß den vom Umweltbundesamt veröffentlichten Vorgaben [17]. Die Methodik orientiert sich an der sog. „Finnischen Allokation“. Dabei werden Brennstoffeinsätze in Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung, wie z.B. Blockheizkraftwerke, und die daraus resultierenden Emissionen der jeweiligen Energieform (elektrisch oder thermisch) zugeordnet. Es wird eine fiktive Primärenergieeinsparung durch die Nutzung von erneuerbaren Energien in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, vom Umweltbundesamt als „vermiedene Emissionen“ bezeichnet, berechnet. Diese wird in einer Bilanz den Emissionen durch ausgewählte Referenzkraftwerke zur Energiebereitstellung aus fossilen Energiequellen gegenüber gestellt. Die Berechnung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die vermiedenen und verursachten Emissionen bestimmt, um daraus eine Netto-Emissionsbilanz bilden zu können. Diese wird anschließend auf den Einwohnergleichwert EW_{CSB} bezogen. Als Emissionsfaktor für den externen Strombezug wird der vom Umweltbundesamt veröffentlichte deutsche Strommix verwendet.

3.2.2 Bilanzierung Treibhausgaspotential

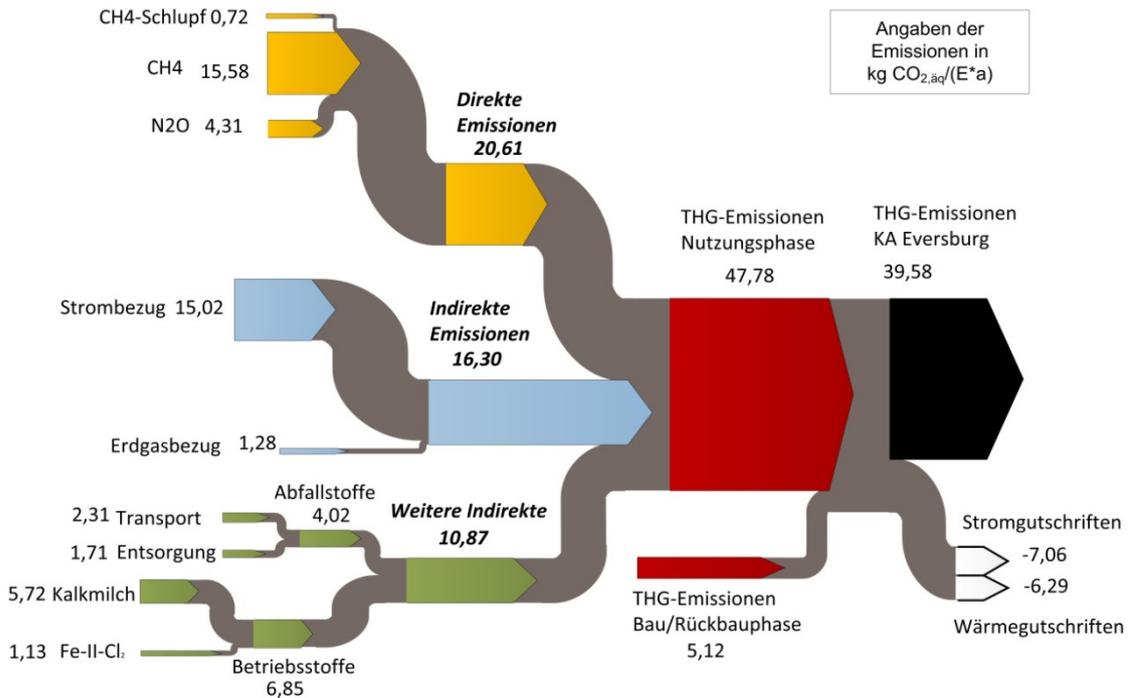


Abb. 12: Sankey – Diagramm zum Treibhausgaspotential

Insgesamt entstehen im Zuge des Reinigungsprozesses rund 53 kg CO_{2,äq}/(E*a). Davon können ca. 13 kg CO_{2,äq}/(E*a) als Gutschriften, welche durch die Nutzung von Faulgas zur Eigenenergieerzeugung entstehen, abgezogen werden. Damit beträgt das Netto-Treibhausgaspotential der Abwasserreinigung ca. 40 kg CO_{2,äq}/(E*a) bzw. 10.500 t CO_{2,äq}/a. Ein Großteil der Brutto-Emissionen (90 %) werden innerhalb der Nutzungsphase verursacht. Die Emissionen stammen zu 43 % aus direkten, zu 34 % aus indirekten und zu 23 % aus weiteren indirekten Quellen. Alternativ zur Betrachtung der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm als Emissionsquelle könnten Gutschriften durch Düngemittlersatz bilanziert werden. So könnte insgesamt ein geringes Treibhausgaspotential bestimmt werden. Der größte Teil des Treibhausgaspotentials durch direkte Emissionen ist mit ungefähr 16 kg CO_{2,äq}/(E*a) der Bildung von Methan zuzuschreiben. Davon wird knapp 1 kg CO_{2,äq}/(E*a) durch den Methanschlupf der BHKW-Motoren verursacht. Im Falle einer Berücksichtigung von direkten CO₂-Emissionen würde sich das Gesamtpotential der Kläranlage Eversburg um ca. 24 kg CO_{2,äq}/(E*a) erhöhen. Lediglich 4 % des Treibhausgaspotentials der indirekten Emissionsquellen sind auf Emissionen aus der Verwendung von fremdbezogener Wärme zurückzuführen. Die Nutzung von fremdbezogener elektrischer Energie wird mit einem Potential von rund 15 kg CO_{2,äq}/(E*a) (38 % der gesamten Treibhausgasemission) bilanziert. Damit liegen die Emissionen aus dem Stromverbrauch und die durch direkte Methanemissionen in ähnlicher Größenordnung. Unter ökologischen Gesichtspunkten ist neben der Umsetzung von Energiesparmaßnahmen auch eine Reduktion der direkt im Abwasserreinigungsprozess emittierten Emissionen erstrebenswert. Dabei wäre eine nähere Betrachtung der verschiedenen Reinigungsverfahren und deren direkte Emissionen erforderlich. Allerdings wurde in einer Literaturrecherche eine große Bandbreite von Emissionsfaktoren für die direkte Emission von Methan und Lachgas identifiziert. Die angegebenen Werte variieren je nach Betriebsweise der Anlage und verwendeten Bestimmungsmethode für die spezifischen Emissionen. Die in der Bilanzierung verwendeten Faktoren sind also mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Inwieweit die Auswahl des jeweiligen Faktors die Gesamtbilanz und das Verhältnis zu Emissionen durch den externen Strombezug beeinflusst, soll im Folgenden dargestellt werden.

Methanemissionen

Die Faktoren für die direkten Methanemissionen liegen je nach Literaturquelle und Bestimmungsmethode in teilweise sehr unterschiedlichen Bereichen. Eine Zusammenstellung des Einflusses potentieller Faktoren zur Bestimmung der Methanemissionen kann Abb. 13 entnommen werden. Dort ist ebenfalls aufgeführt, welchen Anteil die Methanemissionen im Vergleich zu den Emissionen aus dem Fremdbezug von elektrischer Energie aufweisen. Die Höhe der jeweiligen Balken gibt dabei die spezifische Gesamtemission an. Es ist ersichtlich, dass je nach Auswahl einer Literaturquelle unterschiedliche Verhältnisse vorliegen. Die Methanemissionen und indirekte Emissionen durch den Strombezug liegen nicht immer, so wie hier angenommen, in ähnlichen Größenordnungen.

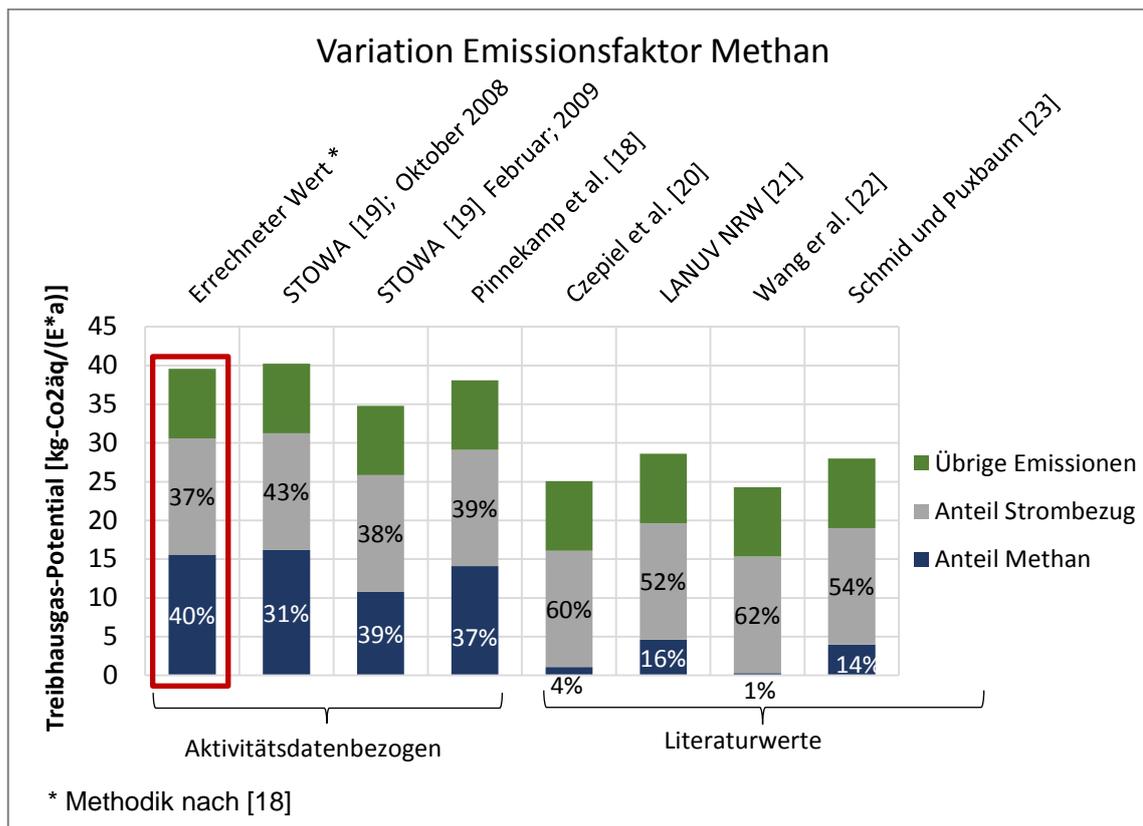


Abb. 13: Ergebnisse Literaturrecherche Methanemission

Auffällig ist, dass bei einer Verwendung von reinen Literaturwerten, ohne Bezug auf die Gegebenheiten der Kläranlage Eversburg, grundsätzlich geringere Emissionen bestimmt worden wären. Diese Vorgehensweise liefert allerdings eine wenig spezifische Einschätzung. Auch sind die Literaturwerte von Czepiel et al. [20], LANUV NRW [21] und Wang et al. [22] aufgrund der abweichenden Verfahren und Betriebsweise nicht für diesen Fall geeignet. In einer Studie von Schmid und Puxbaum [23] werden die Ergebnisse aus Emissionsmessungen der Belebungsstufe einer Versuchskläranlage in Wien vorgestellt. Die Anwendung einer intermittierenden Belüftung spricht für eine Auswahl des bestimmten Emissionsfaktors. Da allerdings nur die biologische Reinigung betrachtet wird und die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus einer Versuchsanlage nicht gewährleistet werden kann, wurde von einer Verwendung abgesehen. Daher ist es ratsam, Emissionsfaktoren zu verwenden, welche sich auf Aktivitätsdaten, wie z.B. die Stickstofffrachten beziehen. Der Emissionsfaktor aus der Studie der niederländischen Stiftung für Wasserforschung STOWA [19] kann aufgrund einer ähnlichen Verfahrensweise und CSB-Zulaufbelastung der betrachteten Kläranlage in Kralingseveer in Betracht gezogen werden. Allerdings sind die beiden Emissionsfaktoren für Oktober und Februar bestimmt worden und können nicht für den Betrachtungszeitraum eines ganzen Jahres genutzt werden. Für die Gesamtbilanz

wurde gemäß Pinnekamp et al. [18] ein Faktor unter Verwendung von Aktivitätsdaten ausgewählt, da dieser die gesamte Abwasserreinigung mit Ausschluss der Schlammbehandlung abbildet. Zudem werden in der Literaturquelle aktuelle Daten angegeben. Der zugehörige Literaturwert wäre $1,46 \text{ kg CO}_{2\text{aq}}/(\text{E}^*\text{a})$ niedriger als der ermittelte Wert der Kläranlage Eversburg. Die Ursache dafür liegt in der Verwendung von spezifischen Aktivitätsdaten. So liegt die für die Kläranlage Eversburg verwendete CSB-Fracht um $12 \text{ g CSB}/(\text{E}^*\text{d})$ höher.

Es ist somit festzuhalten, dass die Höhe der bilanzierten direkten Methanemissionen, deren Verhältnis zu den indirekten Emissionen durch den Bezug elektrischer Energie und somit das insgesamt ermittelte Treibhausgaspotential stark von der Verwendung der jeweiligen Literaturquelle abhängt. Grundsätzlich ist eine Vorgehensweise mit Bezug auf Aktivitätsdaten besser geeignet.

Lachgasemissionen

Mögliche Faktoren zur Bewertung der Lachgasemission und der jeweilige Einfluss der Auswahl einer Literaturquelle sind in Abb. 14 dargestellt. Analog zu den Methanemissionen lassen sich für die Bestimmung des Treibhausgaspotentials zwei Vorgehensweisen unterscheiden. Entweder werden Emissionsfaktoren verwendet, welche einen Bezug zu Aktivitätsdaten der Kläranlage ermöglichen, oder reine Literaturdaten aus Messungen o.ä. übernommen. In die letzte Kategorie sind die Angaben von Schmuck [10] einzuordnen. Dort konnte mittels einer Literaturstudie eine Lachgasbildung von $43,3 \text{ g N}_2\text{O}/(\text{E}^*\text{a})$ ermittelt werden. Dieser Faktor wurde durch Mittelwertfindung aus Emissionsfaktoren von verschiedenen Anlagen bestimmt und ist, da die jeweilige Betriebsweise nicht unbedingt der der Kläranlage Eversburg entspricht, für eine Verwendung ungeeignet. Aus dem gleichen Grund wurden ebenfalls keine Angaben von Taliec et al. [28], Foley et al. [30], McInnes [31] oder Czepiel et al. [32] verwendet. Zu den Literaturquellen, welche eine Verwendung von Aktivitätsdaten vorsehen, gehört eine Veröffentlichung von Kampschreur et al. [24]. Der angegebene Wert wird nicht verwendet, da lediglich die Nitrifikation betrachtet wird. Laut ATV-DVWK Fachausschuss KA-14 [25] sind die Ursachen für eine Lachgasbildung durch Nitrifikation noch wenig erforscht. Gegen die Auswahl eines Emissionsfaktors von Thörn und Sörensson [26] spricht eine Bestimmung mittels Batch-Tests. Die Verwendung von Faktoren aus großtechnischen Anlagen ist aus Gründen der Vergleichbarkeit besser geeignet.

Für die Bilanz wurde der Faktor von Wicht [16] unter der Berücksichtigung von Aktivitätsdaten ausgewählt. Dafür wird die Stickstoffbelastung im Ablauf der Vorklärung ausgewählt. In der Literatur wird der Emissionsfaktor allerdings auf die Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlage bezogen. Da nur die Emissionen aus der biologischen Reinigung betrachtet werden, ist eine Verwendung der Stickstofffracht im Ablauf der Vorklärung vertretbar. Der in der Literaturquelle ermittelte Emissionsfaktor von $0,6\% \text{ N}_2\text{O}/\text{kg N}$ wurde auf Grundlage einer Untersuchung von 25 großtechnischen Kläranlagen ermittelt und bildet deren Durchschnitt ab. Unter Berücksichtigung der spezifischen Stickstofffracht der Kläranlage Eversburg ergibt sich damit eine Lachgasemission von $16,25 \text{ g N}_2\text{O}/(\text{E}^*\text{a})$. Die Untersuchung von mehreren Kläranlagen, unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsweisen, lässt auf eine gesicherte Datenlage schließen. Von den betrachteten Anlagen wurden 20 % mit intermittierender und 28 % mit simultaner Denitrifikation betrieben. Der Emissionsfaktor von $1 \text{ g N}_2\text{O}/\text{kg N}$ für eine intermittierende Belüftung liegt unter dem Durchschnitt der untersuchten Anlagen. Der für eine simultan verlaufende Denitrifikation ermittelte Faktor entspricht dem Durchschnittswert aller Anlagen. Da die für die Kläranlage Eversburg angestrebte intermittierende Denitrifikation z.T. simultan betrieben wird und der Durchschnittswert der Anlagen gleichzeitig die Lachgasbildung im Zuge einer simultanen Denitrifikation abbildet, wurde dieser Faktor für eine Bilanzierung ausgewählt. Im Gegensatz zu den Methanemissionen besteht kein signifikanter Einfluss einer Verwendung von Literaturdaten mit

oder ohne Aktivitätsdatenbezug. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass das Treibhausgaspotential von Lachgas mit einem GWP_{100} von 265 weit über dem von Methan liegt (siehe Tabelle 3).

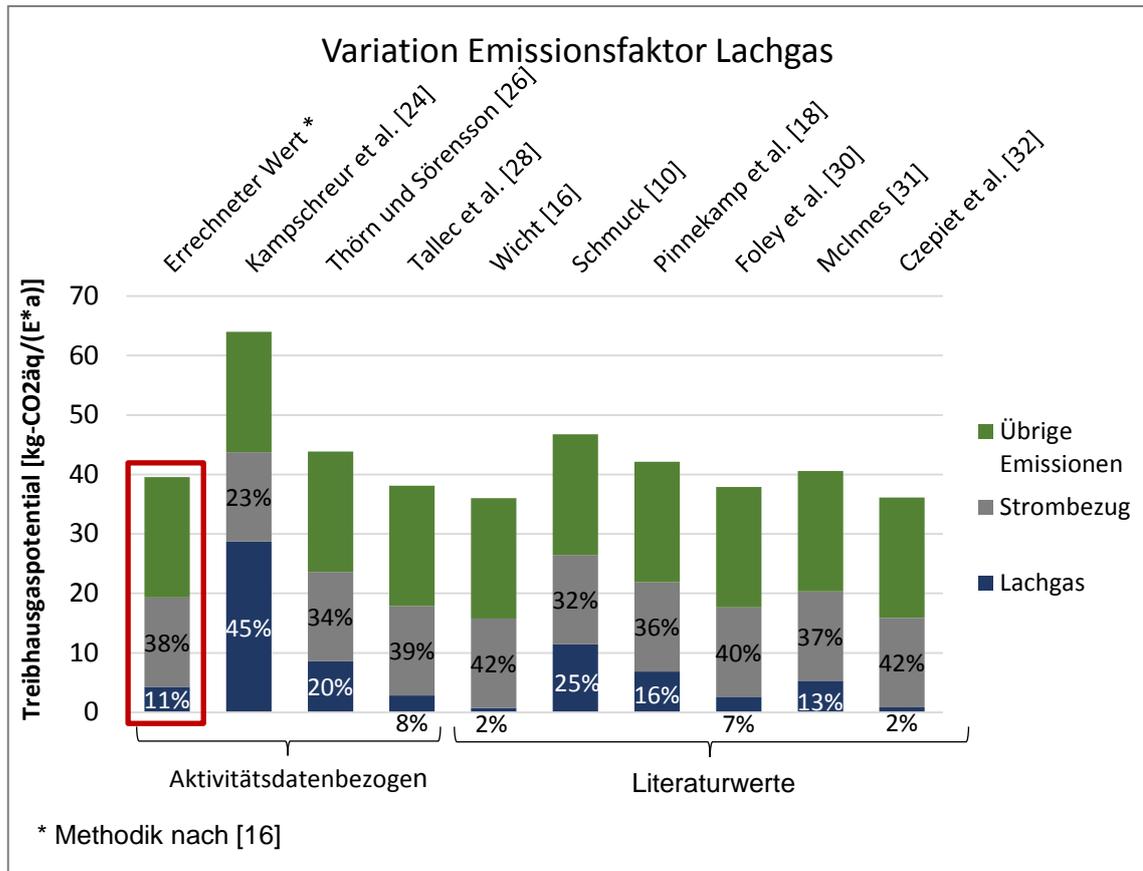


Abb. 14: Ergebnisse Literaturrecherche Lachgasemission

3.2.3 Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen

Die Höhe der durch Energieeffizienzmaßnahmen erzielbaren Minderung des Treibhausgaspotentials steht im direkten Zusammenhang mit dem Emissionsfaktor des deutschen Strommix [33]. Bei der Einschätzung der Umweltauswirkung sollte auch der Zeitpunkt der jeweiligen Umsetzung berücksichtigt werden. Dazu wird, mittels linearer Fortschreibung der bisherigen Daten, eine Prognose der Entwicklung des Strommix erstellt [27]. Auf diese Weise konnte eine jährliche Reduzierung des Emissionsfaktors um $0,0085 \text{ kg CO}_{2,\text{äq}}/\text{kWh}$ ermittelt werden. Als Betrachtungszeitraum werden 20 Jahre gewählt, wobei zu beachten ist, dass die Unsicherheit mit der Länge des Zeitraums zunimmt. Es wird angenommen, dass die Sofortmaßnahmen nach zwei, die kurzfristigen nach fünf und die langfristigen Maßnahmen nach 10 Jahren umgesetzt werden und jeweils zu einer sofortigen Minderung des Treibhausgaspotentials führen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Strombedarf der Kläranlage ebenso wie die Freisetzung von Emissionen aus anderen Quellen ansonsten über den Betrachtungszeitraum konstant bleibt. Es wird jeweils der Emissionsfaktor verwendet, der für das entsprechende Jahr durch die lineare Fortschreibung ermittelt wurde. Bei den Stromeinsparungen durch Steigerung der Eigenstromerzeugung werden die Emissionen, die durch die gesteigerte Verbrennung im BHKW entstehen, im Zuge einer Allokation berücksichtigt.

Wie die Abb. 15 zeigt, würde das Treibhausgaspotential auch ohne die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2021 auf rund $39 \text{ kg CO}_{2,\text{äq}}/(\text{E}^*\text{a})$ sinken. Durch eine Umsetzung der Maßnahmen erfolgt eine Verstärkung dieses Trends. Würden alle Maßnahmen

realisiert werden, könnte das Treibhausgaspotential bis zum Jahr 2021 auf einen Wert von ca. 36 kg CO_{2,äq}/(E*a) gemindert werden. Das größte Einsparpotential geht von den abhängigen Maßnahmen aus. Es zeigt sich, dass gerade vor dem Hintergrund der hohen direkten Emissionen das Potential zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Bereich der indirekten Emissionen durch Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen relativ gering ist.

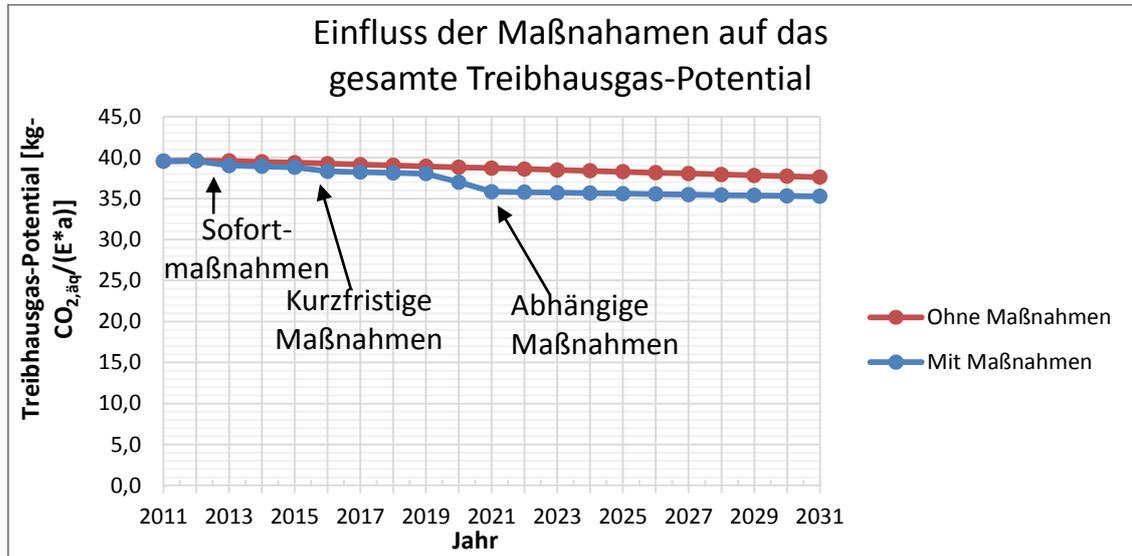


Abb. 15: Entwicklung des Treibhausgaspotentials

Aufgrund der dargestellten Vorgehensweise unterscheiden sich die ermittelten Werte für die Einsparungen an Treibhausgasemissionen von denen, die in der ersten Projektphase ermittelt wurden. Während dort ein Emissionsfaktor von 564 g CO_{2,äq}/kWh verwendet wurde, erfolgt die Bestimmung der Einsparpotentiale in diesem Projektabschnitt anhand der aktualisierten Angaben des Umweltbundesamtes [33]. Wie der folgenden Tabelle zu entnehmen ist, liegt das Treibhausgaspotential, welches die Entwicklung des dt. Strommix berücksichtigt, für die Sofortmaßnahmen und kurzfristigen Maßnahmen nur geringfügig niedriger. Hingegen sind die Einsparungen durch die langfristigen Maßnahmen um 103 t CO_{2,äq}/a und die Maßnahmen insgesamt um 93 t CO_{2,äq}/a größer als die zuvor ermittelte Reduzierungen.

Einsparmaßnahme	Einsparung Strombezug [kWh/a]	Einsparungen THG-Potential [t-CO _{2,äq} /a]	
		Berücksichtigung Entwicklung Strommix	Ergebnisse 1. Projektabschnitt [1]
Sofortmaßnahme	257.900	145	259
Kurzfristige Maßnahme	201.200	105	
Langfristige Maßnahme	767.500	536	
Summe	1.227.000 ¹	786	

Tabelle 4: Potential der Einsparungsmaßnahmen

Das geringere Einsparpotential durch Sofortmaßnahmen und kurzfristige Maßnahmen resultiert aus dem geringeren Emissionsfaktor. Allerdings ist dieser Unterschied nicht groß, sodass es lediglich zu einer Abweichung von 9 t CO_{2,äq}/a kommt. Ein deutlich größerer Unterschied in den Einsparungen durch langfristige Maßnahmen wird durch die verwendeten Allokationsmethoden verursacht. Da das Einsparpotential der langfristigen Maßnahmen ein Großteil des Gesamtpo-

¹ Abweichung der Summe durch Rundungen bedingt

tentials ausmacht, ist dieses ebenfalls größer als der im ersten Projektabschnitt angegebene Wert.

Indem die Reduzierung des Treibhausgaspotentials durch Energieeinsparmaßnahmen in Bezug zur Entwicklung des dt. Strommix gesetzt wird, kann der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die jeweiligen Maßnahmen erst nach unterschiedlichen Zeitspannen umgesetzt werden. Des Weiteren werden bei den langfristigen Einsparungen auch die durch erhöhte Eigenstromerzeugung verursachten Emissionen berücksichtigt.

3.3 Zukunftskonzept

Die Bedeutung von ressourcenschonenden und energieeffizienten Verfahren zur Abwasserreinigung nimmt stetig an Bedeutung zu. Im Folgenden werden perspektivische Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese Verfahren genutzt werden können, um den Anforderungen einer zukünftigen Abwasserinfrastruktur gerecht zu werden. Als weniger energieintensive Alternative zu den herkömmlichen Prozessen wie Nitrifikation und Denitrifikation, soll die Deammonifikation vorgestellt werden. Weiterhin werden Verfahren vorgestellt, welche im Rahmen der Umsetzung einer sog. Vierten Reinigungsstufe einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Keimen und der Entfernung von refraktären Mikroschadstoffen leisten können.

3.3.1 Deammonifikation

Die Deammonifikation beschreibt einen zweistufigen Prozess zum Abbau von Ammonium. Dabei werden jeweils etwa 50% des Ammoniums zunächst aerob zu Nitrit oxidiert und 50% zusammen mit dem gebildeten Nitrit zu elementarem Stickstoff und geringen Mengen Nitrat umgewandelt. Da im Gegensatz zum Verfahren der Nitrifikation/Denitrifikation nur ein Teil des Ammoniums oxidiert wird, kann eine Energieeinsparung durch geringere Belüftung erzielt werden. Anders als bei der Denitrifikation ist bei der Deammonifikation keine zusätzliche Kohlenstoffquelle erforderlich. Daher können Betriebsmittel wie z.B. Methanol eingespart werden. Insgesamt weist die Deammonifikation eine günstigere CO₂-Bilanz auf, da aufgrund der autotrophen Ammoniumumwandlung größere Mengen CO₂ aufgenommen als gebildet werden. Somit ist diesem Verfahren ein gesteigertes Potential zur Minimierung des Carbon Footprint zuzuschreiben.

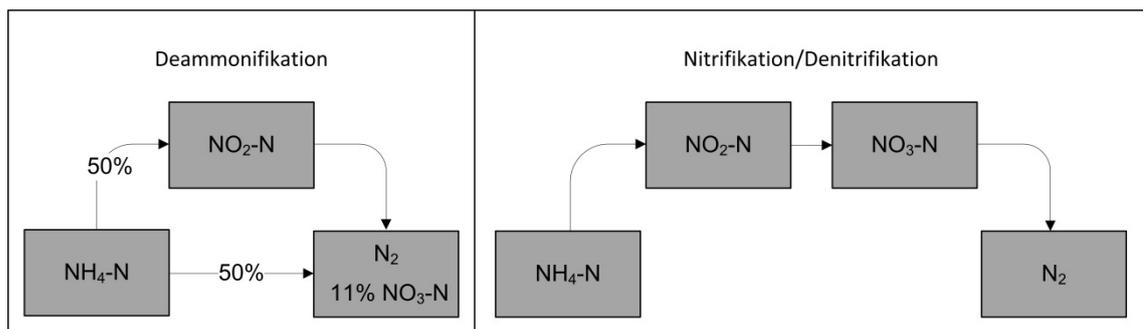


Abb. 16: Deammonifikation und Nitrifikation/Denitrifikation

Eine Übersicht zur verfahrenstechnischen Umsetzung der Deammonifikation ist bei Beier et al. [34] zu finden. Der Energiebedarf des Ammoniumabbaus variiert je nach Verfahren und Betriebsweise, wie die folgenden Beispiele zeigen. So konnte der spezifische Strombezug auf der Kläranlage Hattingen zwar durch eine Umsetzung als DIB - Verfahren (Deammonifikation im intervallbelüfteten Biofiltersystem) um 4,78 kWh/ kg N_{eli} gegenüber einer Verwendung von Nitrifikation/Denitrifikation reduziert werden, dennoch liegt der Bedarf mit 5,65 kWh/ kg N_{eli} noch relativ hoch [35]. Deutlich geringere Verbräuche konnten durch die Realisierung eines DEMON-Verfahrens auf der Kläranlage Strass in Österreich erreicht werden. Während die SBR-Anlage

mit der Betriebsweise Nitrifikation/Denitrifikation noch 2,9 kWh/ kg N_{eli} verbrauchte, konnte durch eine Umstellung auf Deammonifikation eine Minderung des Bedarfes auf 1,1 kWh/ kg N_{eli} erreicht werden [36]. Werte dieser Größenordnung können auch von Lackner et al. [37] bestätigt werden.

Um das potentielle Einsparungspotential für die Umstellung der Filtratwasserbehandlung abschätzen zu können, müssen einige Annahmen getroffen werden. So kann davon ausgegangen werden, dass die Stickstoffbelastung des Filtratwassers nach der Faulung etwa zwischen 20 % - 50 % der Ammoniumfracht im Zulauf der Kläranlage liegt. Da aber nur geringe Mengen an Fremdschlämmen o.ä. zu berücksichtigen sind, wurde ein Wert von 30 % ausgewählt [38]. Mit einem mittleren Wirkungsgrad von 75 % würden 337,7 kg N/d eliminiert werden. Im ersten Projektabschnitt wurde für die Umsetzung einer Deammonifikation eine mögliche Einsparung von 221.600 kWh/h ermittelt. Damit ergäbe sich ein spezifischer Strombedarf von 2,21 kWh/ kg N_{eli} .

Bei der Umstellung der Verfahrensweis auf eine Deammonifikation ist zu beachten, dass die biologischen Umwandlungsprozesse sensibel gegenüber einer Veränderung von äußeren Einflussfaktoren sind. So haben z.B. eine Ammoniak- Hemmung und die toxische Wirkung von erhöhten Nitrit-Konzentrationen negative Auswirkungen auf die Stabilität des Prozesses. Aufgrund der niedrigen Wachstumsraten der anaerob Ammonium oxidierenden Bakterien ist eine optimierte Inbetriebnahme durch größere Mengen an Impfschlamm ratsam.

3.3.2 Vierte Reinigungsstufe

Neben der Forcierung einer möglichst energieeffizienten Abwasserbehandlung ist es ebenso nötig, den Anforderungen an eine Eliminierung von Mikroschadstoffen gerecht zu werden. Dazu können oxidative, adsorptive oder physikalische Mechanismen genutzt werden, wie Abb. 17 zeigt. Eine Kombination verschiedener Verfahren ist ebenfalls möglich. Allerdings sind Filtrationsverfahren laut Umweltbundesamt nach dem heutigen Kenntnisstand nicht für den Einsatz in Kläranlagen geeignet, da sie einen zu hohen Energiebedarf aufweisen. Gleiches gilt für den Einsatz von Advanced Oxidation Processes (AOP), wobei eine Oxidation von Abwasserinhaltsstoffen mittels Hydroxyl-Radikale (OH) erfolgt [39].

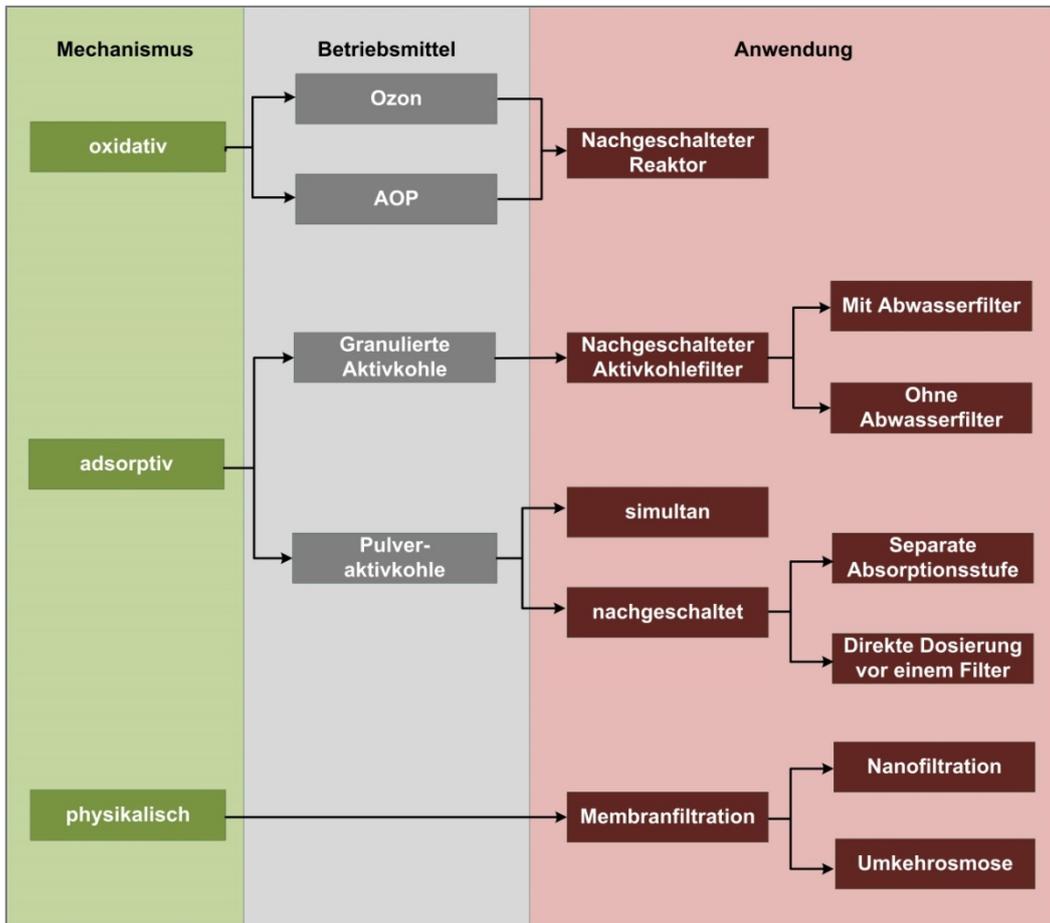


Abb. 17 Übersicht Verfahren Vierte Reinigungsstufe [39]

Das Umweltbundesamt hat folgende Übersicht zu Vor- und Nachteile der für die Abwasserbehandlung relevanten Verfahren zusammengestellt:

	Vorteile	Nachteile
Ozon	<ul style="list-style-type: none"> Einfache und flexible Dosierung Keine Entstehung von zusätzlichen Feststoffen Verbesserung Hygieneparameter im Kläranlagenablauf 	<ul style="list-style-type: none"> Bildung von ggf. toxischen Transformationsprodukten Hoher Energiebedarf für die Herstellung des Ozon Hohe Sicherheitsanforderungen Arbeitsschutz
PAK	<ul style="list-style-type: none"> Einfache und flexible Dosierung Zusätzliche Verringerung CSB-Ablaufwerte Verringerung der P_{ges}-Ablaufwerte aufgrund verfahrensbedingten zusätzlicher Zugabe von Fällmittel Erhöhter Heizwert des Klärschlammes aufgrund der beinhaltenen PAK 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Klärschlammfalls Entsorgungsproblematik des mit Aktivkohle vermischten Klärschlammes aufgrund enthaltener Spurenstoffe Einmalige Verwendung der Aktivkohle aufgrund unwirtschaftlicher Regenerierung Mögliche Verlagerung der Umweltverschmutzung ins Ausland
GAK	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit zur Regenerierung der ausgeschöpften Aktivkohle → mehrfache Verwendung Aktivkohle Zusätzliche Verringerung CSB-Ablaufwerte 	<ul style="list-style-type: none"> Konzentrationsanstieg bei Erreichung der Adsorptionskapazität arbeitsintensiver Austausch Filterbett Mögliche Verlagerung der Umweltverschmutzung ins Ausland

Tabelle 5: Vor- und Nachteile Vierte Reinigungsstufe [39]

Nachfolgend sollen daher nur die Verwendung von Ozon und eine Nutzung von Pulveraktivkohlen (PAK) mit nachgeschalteter Flockungsfiltration näher betrachtet werden. Bei der Verwendung von Ozon zur Eliminierung von Mikroschadstoffen im Abwasser ist, neben der Ozonerzeugung in einem Kontaktbecken, zusätzlich eine Abluftreinigung sowie eine Nachbehandlung des Abwassers in einem Sandfilter nötig, wie in Abb. 20 dargestellt.

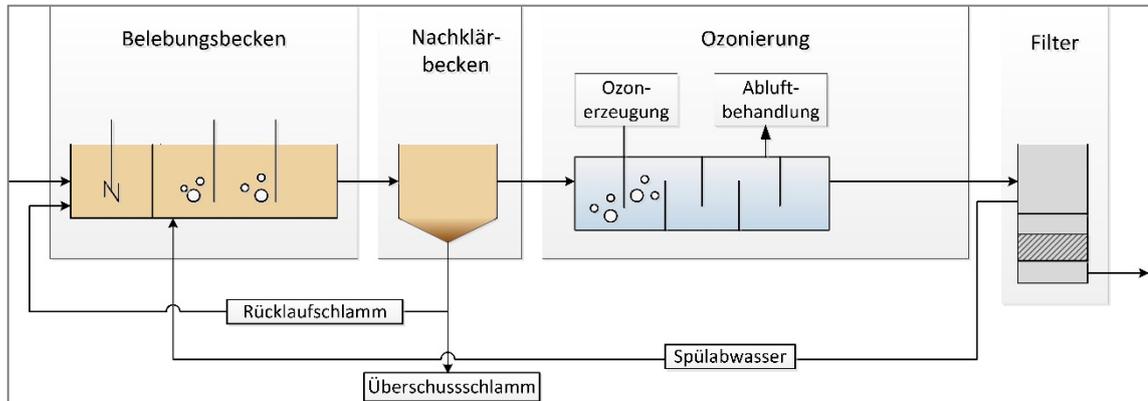


Abb. 18: Schematische Darstellung Ozonierung nach [39]

Die Abb. 21 zeigt, dass auch bei der Dosierung von Pulveraktivkohle in einer nachgeschalteten Absorptionsstufe eine anschließende Behandlung des Abwassers durch einen Filter erfolgt. Während dieser bei der Ozonierung direkt auf das Kontaktbecken folgt, wird zur Entfernung der Aktivkohle zuvor ein Sedimentationsbecken durchlaufen. Der abgesetzte Aktivkohleschlamm wird in das Reaktionsbecken zurückgeführt und die Überschussschicht in das Belebungsbecken geleitet.

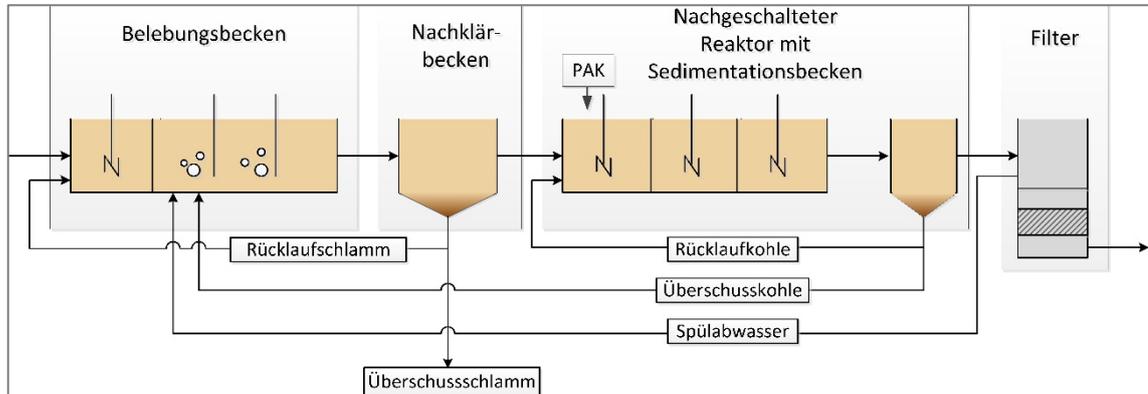


Abb. 19: Schematische Darstellung Dosierung Pulveraktivkohle (PAK) nach [39]

Ein Vergleich der Reinigungsleistung durch Bolle und Pinnekamp [40] zeigt, dass bei der Eliminierung von Pharmaka und Industriechemikalien eine Verwendung von Ozon bessere Ergebnisse als eine nachgeschaltete PAK-Dosierung liefert. Weiterhin wurde von Bolle und Pinnekamp auch die durch die Entfernung von Spurenstoffen verursachte CO₂-Emission untersucht. Dabei wurden die Herstellung und der Transport der Inputstoffe sowie der Aufbau einer nötigen Infrastruktur und der jeweilige Energiebedarf des Verfahrens berücksichtigt. Die CO₂-Emissionen der beiden Verfahren liegen in ähnlichen Größenordnungen, wobei die Emissionen einer Ozonierung leicht unter denen einer PAK-Dosierung liegen. Genauere Angaben dazu sind im Anhang zu finden.

Das Umweltbundesamt hat für die Kosten für eine Eliminierung von Mikroschadstoffen eine Regressionsfunktion auf Grundlage einer Literaturstudie ermittelt. Dabei wurden sowohl eine Behandlung mit Ozon, als auch mit PAK und granulierter Aktivkohle (GAK) mit den in Abb. 19

dargestellten Anwendungsformen untersucht. Die Regressionsgerade beschreibt die spezifischen Kosten in € pro m^3 Jahresabwassermenge und in Abhängigkeit der Ausbaugröße. Für die Kläranlage Eversburg mit 250.000 EW würden sich die gesamten spezifischen Kosten auf ca: $0,11 \text{ €/m}^3$ belaufen, wobei $0,06 \text{ €/m}^3$ für die Eliminierung der Spurenstoffe und die übrigen Kosten für die Nachbehandlung aufzuwenden wären [39].

Ein detailliertere Darstellung der Investitions- und Betriebskosten ist mittels einer von Türk et al. [41] entwickelten Kostenfunktionen möglich. Dort wird jedoch nur die Verwendung von Ozon und einer PAK-Dosierung mit nachgeschalteter Filtration betrachtet. Zur Bestimmung der einzusetzenden Jahresabwassermenge wurde eine Bemessungswassermenge von $Q_{d,M} = 42.000 \text{ m}^3/\text{d}$ nach Angaben von Mennerich [42] verwendet. Türk et al. [41] gehen bei einer Ausbaugröße von 250.000 EW von einer Jahresabwassermenge in der Größenordnung von 17,2 Mio. m^3 aus. Unter Verwendung dieser Angaben lägen die Kosten etwas höher. Detailliertere Auskünfte zu den verwendeten Kostenfunktionen sind dem Anhang zu entnehmen. Eine Zusammenstellung der für die Kläranlage Eversburg ermittelten Kosten ist in Tabelle 6 zu finden.

Kostenart		Kosten [€]	
		Ozon	PAK
Investitionskosten		3.385.900	4.781.300
Betriebskosten	Energie	84.800	41.900
	Betriebsmittel	90.100	255.100
	Summe	174.900	297.000
Jahreskosten		571.800	857.500

Tabelle 6: Kosten Vergleich Ozonierung und Pulveraktivkohle-Dosierung

Die Nebenkosten schließen u.a. Honorare, Gutachten und Unvorhergesehenes mit ein. Zu den Kosten der Betriebsmittel werden neben den Aufwendungen für die eigentlichen Betriebsmittel auch die Kosten für Energie, Personal, Wartung und Instandhaltung gerechnet. Ein Vergleich zwischen der Verwendung von Ozon und PAK zeigt, dass die Betriebsmittelkosten für Aktivkohle deutlich höher als die reinen Betriebsmittelkosten der Ozonierung sind. Von größerer Bedeutung kann jedoch die Tatsache sein, dass die Energiekosten der Ozonierung, aufgrund der energieintensiven Herstellung, ungefähr 50 % höher liegen. Dabei ist der Einfluss steigender Strompreise auf die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme, welche ausführlich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse erläutert wurde, zu beachten, so dass sich das derzeitige Bild gem. Tabelle 6 ändern kann.

3.4 Energetische Modellerstellung

3.4.1 Entwicklung eines Kalkulationswerkzeugs

Im Rahmen des Arbeitspunktes „Energetische Modellerstellung“ wurde in Microsoft Excel 2013 ein Kalkulationswerkzeug entwickelt, welches dem Anwender ermöglicht, die in den vorhergegangenen Kapiteln vorgestellten Zusammenhänge für verschiedene Maßnahmen zu untersuchen. Weiterhin werden ökonomische Auswirkungen einer potentiellen Umsetzung ermittelt. Das Modell ist durch ein hohes Maß an Flexibilität gekennzeichnet. Es wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, den Untersuchungsrahmen in Bezug auf die Variation der Eingangsparameter frei zu wählen. Gleichzeitig wird eine Hilfestellung durch Angabe eines groben Parameterbereiches auf Grundlage der Abschätzung aus Kapitel 3.2.1 gegeben. So wird eine gut angepasste Grundlage für eine Sensitivitätsanalyse geschaffen. Des Weiteren wurden Default-Werte auf Grundlage einer Literaturrecherche implementiert. Es kann sowohl eine singuläre als

auch eine multiple Untersuchung durchgeführt werden. Dabei wird die Methode der kritischen Werte angewandt. Es können jeweils die Werte für den Strompreisindex (SPI), Verbraucherpreisindex (VPI) und Zinssatz ermittelt werden, für die das Kosten-Nutzen-Verhältnis einen zuvor ausgewählten Grenzwert annimmt. Damit lässt sich abschätzen, unter welchen Bedingungen eine Veränderung der Wirtschaftlichkeit erfolgt. Zudem werden auf Grundlage einer Dreipunktschätzung verschiedene Szenarien für einen Best-Case, Worst-Case und einen realistischen Fall entwickelt. Für den realistischen Fall wird angenommen, dass der Strompreisindex (SPI) um ca. 2,6 % p.a. stärker ansteigt als der Verbraucherpreisindex (VPI), dies entspricht der tatsächlichen Situation in der mittleren Vergangenheit. Die verschiedenen Varianten können in einem Szenario-Bericht angezeigt werden. Dieser wird bei Änderung der Eingabedaten nicht überschrieben, sodass verschiedene Maßnahmen und Eingabekonstellationen miteinander verglichen werden können. Außerdem sind die Ergebnisse der Untersuchung des Carbon Footprint im Modell berücksichtigt, sodass die Umweltauswirkungen der einzelnen Maßnahmen dargestellt werden können. Die für Bestimmung des Carbon Footprint verwendeten Faktoren können in einer eigenen Sensitivitätsanalyse untersucht werden. Das Kalkulationswerkzeug ist als Datei im Anhang beigefügt. Bei der Verwendung ist darauf zu achten, die Verwendung von Makros in Microsoft Excel zu aktivieren.

In einer ersten Anwendung wurde dieses Kalkulationswerkzeug genutzt, um die im ersten Projektabschnitt identifizierten Energieeffizienzmaßnahmen zu bewerten und Varianzen aufzuzeigen.

3.4.2 Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen

Für die ökonomische Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen werden Bedingungen ermittelt, die einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzen. Um diese Veränderungen abschätzen zu können werden kritische Werte bestimmt und verschiedene Szenarien aufgezeigt. Folgende Ausgangsdaten für den Untersuchungsrahmen wurden für die Analyse der einzelnen Maßnahmen ausgewählt:

Allgemeine Daten	
Laufzeit	10 a
Zins	3,00 %
Aktueller Strompreis	0,11 €

Tabelle 7: Allgemeine, nicht variierte Eingangsdaten

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Zins	0,5 %	5,5 %
VPI	0 % p.a.	4 % p.a.
SPI	2 % p.a.	8 % p.a.

Tabelle 8: Untersuchungsbereich für variable Eingangsdaten

Bei einem Ausgangszinssatz von 3 % würde der kalkulatorische Zinssatz gemäß der Angaben aus Tabelle 8 in einem Bereich von 0,5 % bis 5,5 % untersucht werden.

3.4.2.1 Methode der kritischen Werte

Für die im ersten Projektabschnitt entwickelten Maßnahmen werden in diesem Abschnitt kritische Eingangsparameter vorgestellt. Hierbei werden eine singuläre Variation und eine gleichzeitige Variation von drei Größen beschrieben. Es werden jeweils kritische Werte für die Eingangsgrößen hinsichtlich einer Veränderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses ermittelt. Dazu wird jeweils das Grenzverhältnis verwendet, für das eine Zuordnung der Maßnahme in die nächst bessere bzw. schlechtere Charakterisierungsgruppe erfolgt. So kann beispielsweise

ermittelt werden, unter welchen Bedingungen eine Maßnahme, welche derzeit als kurzfristige eingestuft ist, aufgrund der Änderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses z.B. den Sofortmaßnahmen zuzuordnen ist. Indem die Charakterisierung der Maßnahmenpakete in Form der Grenz-Kosten-Nutzen-Verhältnisse (Grenz-K/N) berücksichtigt wird, kann eine erste Aussage über die Empfindlichkeit gegenüber einer Änderung von ökonomischen Parametern getroffen werden. Die jeweiligen Grenzen liegen bei 0,3 und bei 0,7 sowie bei 1, wie Tabelle 9 zu entnehmen ist. Als Quelle für die Einteilung der Maßnahmenpakete wurde, wie schon im ersten Projektabschnitt, folgende Charakterisierung verwendet [43]:

Maßnahme	Charakterisierung	Bereich	Realisierung
Sofortmaßnahme (S)	Sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis: Einfach umzusetzende Maßnahmen ohne größere Investition und Planungsaufwand, bewirken keine betrieblichen, abwassertechnischen, bauphysikalischen oder sonstige Probleme	<0,3	bis 2 Jahre
Kurzfristige Maßnahme (K)	Gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis: Maßnahmen, die in der Energieanalyse als wirtschaftlich und technisch machbar eingestuft werden und für eine kurzfristige Bearbeitung und Umsetzung vorgeschlagen werden, auch bei ohnehin vorgesehener energetischer Sanierung der Anlage durchzuführen	0,3-0,7	bis 5 Jahre
Abhängige Maßnahme (A)	Schlechteres Kosten-Nutzen-Verhältnis: Maßnahmen, die wegen ungünstigem Kosten-Nutzen-Verhältnis oder anderen Abhängigkeiten nur im Rahmen von ohnehin fälligen Neu- oder Umbauten realisiert werden können	0,7-0,1	bis 10 Jahre

Tabelle 9 Charakterisierung Maßnahmen nach Kosten-Nutzen-Verhältnis

Von besonderem Interesse ist die Fragestellung, bei welcher Parameterkonstellation eine abhängige Maßnahme als kurzfristig oder als unwirtschaftlich zu klassieren ist. Diese Maßnahmen besitzen das größte Einsparpotential bei gleichzeitig sehr hohem Investitionsrisiko. Daher liegt der Fokus auf der Analyse den beiden abhängigen Maßnahmen Erneuerung von zwei Blockheizkraftwerken (A1) und Umsetzung einer neuen Druckbelüftung (A2). Für die Untersuchung der kritischen Werte werden Graphiken verwendet. Diese werden beispielhaft anhand der abhängigen Maßnahmen erklärt. Die Graphiken für die übrigen Maßnahmen sind dem Anhang zu entnehmen. Bei der Bewertung der Maßnahmen wird aufgrund der historischen Preisentwicklungen ein gegenüber dem Verbraucherpreis stärker ansteigenden Strompreis angenommen. Dieser Zusammenhang kann bei Bedarf mit Hilfe des Kalkulationswerkzeuges variiert werden.

Zur Bewertung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Einsparungsmaßnahmen werden jeweils für Zinssätze im Bereich 0,5%- 5,5% Kombinationen von Entwicklungen des Strom- und Verbraucherpreises (kritische Werte SPI und VPI) ermittelt, für die ein bestimmter Grenzwert des Kosten- Nutzen- Verhältnis erreicht wird. Damit wird untersucht, ob gemäß Tabelle 9, eine Maßnahme bzgl. ihrer Wirtschaftlichkeit anders einzuordnen ist und damit z.B. als kurzfristige Maßnahme bezeichnet werden kann.

Die beiden Abhängigen Maßnahmen A1 und A2 haben sich dabei als die interessantesten Projekte ergeben, da Sie einerseits bei der statischen Kosten-Nutzenbetrachtung mit Werten von 0,9 und 1,0 nur knapp grenzwertig überhaupt wirtschaftlich sind, aber andererseits das mit Abstand größte Energieeinsparpotential beinhalten. Deshalb soll hier eine vertiefte Betrachtung und Bewertung der möglichen Variation der Eingangsparameter durchgeführt werden.

Abhängig Maßnahmen

Maßnahmen A1 (Erneuerung von zwei Blockheizkraftwerken)

In einem ersten Schritt wird jeweils ein Preisindex bei verschiedenen Zinssätzen variiert. Für den Preisindex, welcher zunächst nicht verändert wird, werden jeweils die Durchschnittswerte der Vergangenheit (vgl. Tabelle 2) angenommen. Die kritischen Werte für einen Anstieg des Strompreises (SPI), des Verbraucherpreises (VPI) und des Zinssatzes, bei der die Maßnahme A1 eine signifikante Veränderung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses erfährt, sind in den Abbildungen 20 und 21 dargestellt. Während in Abbildung 20 der Strompreis bei einem konstant gehaltenen Verbraucherpreis von 1,6 % p.a. variiert wurde, zeigt Abbildung 21 den Einfluss eines unterschiedlich starken Anstieges des Verbraucherpreises bei einer unveränderten Strompreisentwicklung (4,3 % p.a.). Die Grenzen der Bereiche, welche zur Charakterisierung der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme benutzt werden, sind durch gestrichelte Linien dargestellt.

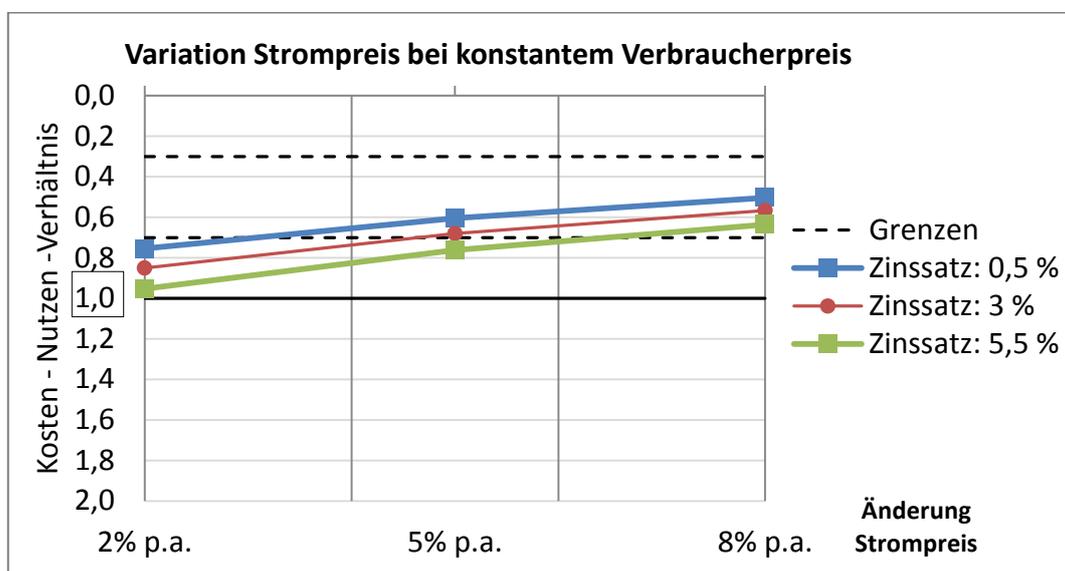


Abb. 20: Änderung Strompreis Maßnahme A1 (VPI = 1,6%)

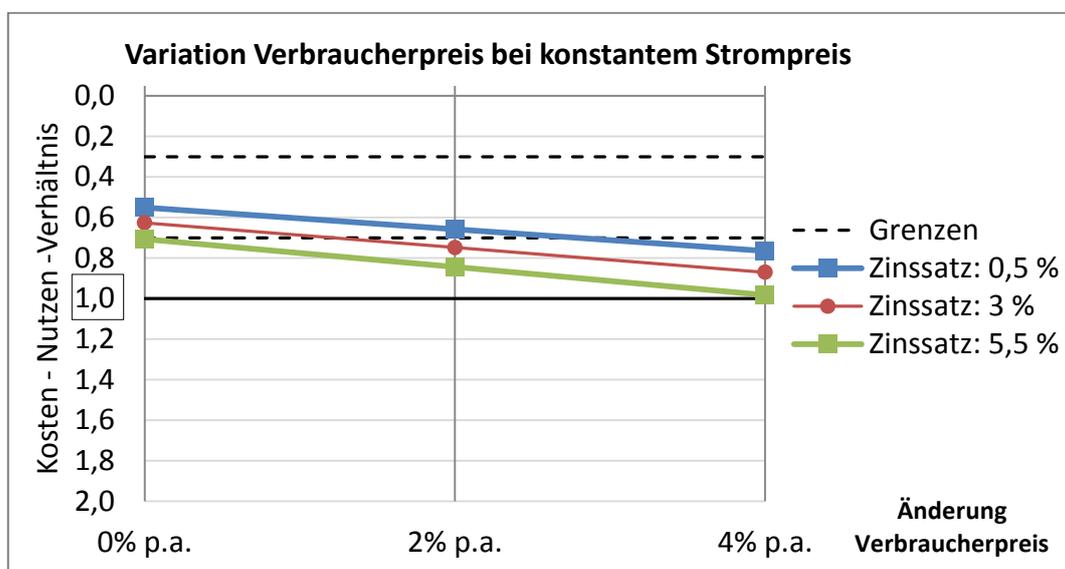


Abb. 21: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme A1 (SPI = 4,3%)

Bei einer Änderung des Strompreises von kleiner als 1,8 % p.a., einer Änderung des Verbraucherpreises von 4,3 % p.a. und einem Zinssatz von 5,5 % wird die Maßnahme unwirtschaftlich. Auch bei einer Steigerung des Strompreises von über 4,2 % p.a., einer mittleren Änderung des Strompreises von 1,6 % p.a. (historischer Durchschnitt) und einem Zinssatz von 5,5 % ist die Maßnahme unwirtschaftlich. Eine Preisentwicklung dieser Größenordnung liegt außerhalb des gewählten Untersuchungsbereiches, da in der Vergangenheit ein deutlich stärkerer Anstieg des Strompreises zu verzeichnen war. Zudem ist ein Zinssatz von 5,5 % vor dem Hintergrund der aktuellen Geldpolitik der Europäischen Zentralbank derzeit unrealistisch. Somit ist die Maßnahme A1 innerhalb eines realistischen Variationsbereiches wirtschaftlich.

Erfolgt eine gleichzeitige Änderung aller drei Eingangsgrößen, wird die Grenze zur Einstufung als kurzfristige Maßnahme (0,7) bei einem Zinssatz von 3 %, bei einer Steigerung des Strompreises um 5,8 % p.a. und bei einer Verbraucherpreissteigerung um 2,54 % p.a. erreicht.

Eine gemeinsame Darstellung aller drei Eingangsfaktoren in einem Diagramm kann mit Hilfe des Kalkulationswerkzeuges erzeugt werden (siehe Anhang Abb. 27). Dort wird deutlich, dass bei höheren Zinssätzen eine größere Differenz zwischen SPI und VPI nötig ist, um eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Damit zeigt sich, dass sich diese Maßnahme besonders sensibel gegenüber Veränderungen der Indizes zeigt und daher regelmäßig anhand aktualisierter Zahlen auf Wirtschaftlichkeit untersucht werden sollte.

Maßnahme A2 (Belüftung Biologie - Einsatz einer neuen Druckbelüftung)

Die folgenden Abbildungen zeigen den Einfluss von unterschiedlich stark ansteigenden Preisindizes bei unterschiedlichen Zinssätzen. Dabei wurde jeweils die Variation eines Indizes betrachtet, während für den anderen Preisindex eine unveränderte Entwicklung angenommen wurde. Diese lehnt sich an den durchschnittlichen Werten der Vergangenheit an.

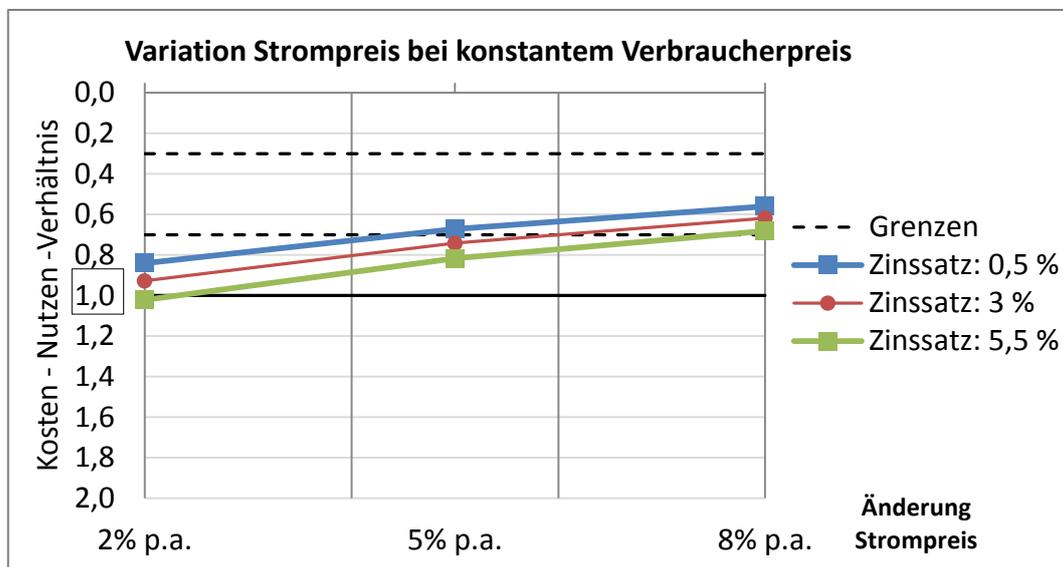


Abb. 22: Änderung Strompreis Maßnahme A2 (VPI = 1,6%)

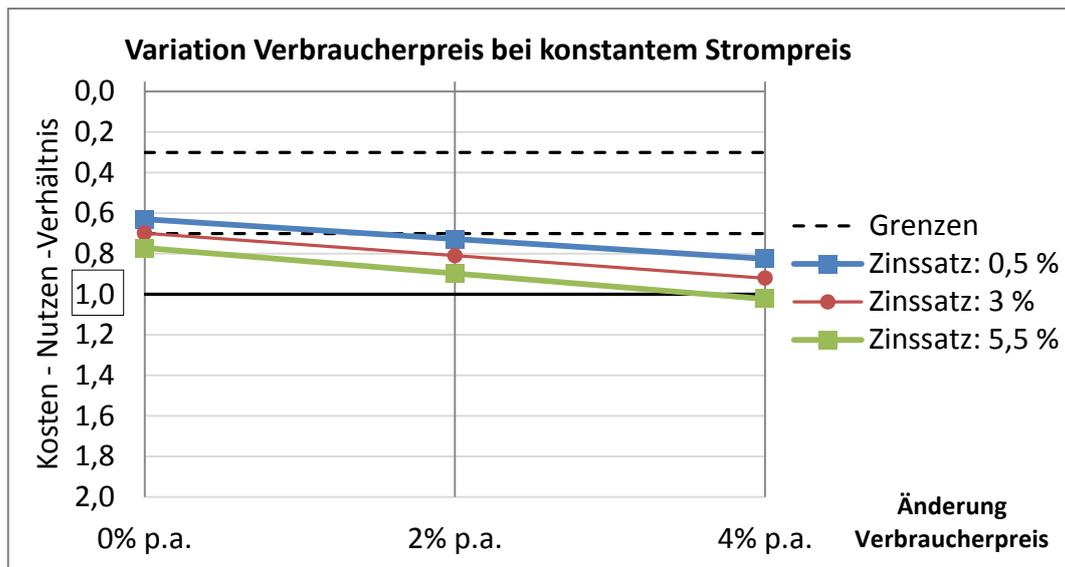


Abb. 23: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme A1 (SPI = 4,3%)

Bei einer Steigerung des Verbraucherpreises im historischen Durchschnitt von 1,6 % p.a. ist die Maßnahme A2 bei einem hohem Zinssatz von 5,5 % und einen Anstieg des Strompreises ab 2,3 % p.a. wirtschaftlich. Bei einem Anstieg des Verbraucherpreises von weniger als 3,6 % p.a. bei einer historischen Durchschnittsänderung des Strompreises um 4,3 % p.a. ist die Maßnahme ebenfalls wirtschaftlich.

Bei einer gleichzeitigen Variation aller Eingangsparameter wird bei einem Zinssatz von 0,5 % und einer Anstieg des Strompreises um 4,6 % p.a. sowie einer Steigerung des Verbraucherpreises um 1,8 % p.a. ein Grenz- Kosten- Nutzen- Verhältnis von 0,7 erreicht. Damit wäre die Maßnahme als kurzfristig zu charakterisieren.

Sollte der VPI allerdings stärker ansteigen als der SPI, kann bei einer Verringerung des Zinssatzes davon ausgegangen werden, dass die Maßnahme unwirtschaftlich wird.

Sofortmaßnahmen und kurzfristige Maßnahmen

Maßnahmen S1 bis K1

Die Maßnahme S1 (Faulraumbeschickung - Außerbetriebnahme eines Mazerators) kann nicht analysiert werden, da bei der Umsetzung keine Investitionskosten entstehen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Maßnahmen S2 (Überschussschlamm-speicher - stoßweise Belüftung mittels bestehender grobblasigen Belüftung) und S3 (Filtratwasserbehandlung - Bedarfsweise Abschaltung der Gebläse) liegt unterhalb des Grenzwertes $K/N < 0,3$. Damit sind diese Maßnahmen innerhalb des Untersuchungsrahmens in jedem Fall den Sofortmaßnahmen zuzuordnen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Robustheit gegenüber einer Änderung der Randbedingungen aus. Gleiches gilt für die Maßnahme K1, welche allerdings aufgrund der Größe des Eingriffs in die Abwasserbehandlung als kurzfristige Maßnahme eingeteilt wurde [1].

Maßnahme K2 (Belüftung Biologie - Nachrüstung von Leitblechen für nachträglich installierte Walzenbelüfter)

Auch unter ungünstigen Randbedingungen bleibt die Maßnahme K2 mit dem ursprünglichen Kosten-Nutzen-Verhältnis von 0,58 wirtschaftlich ($K/N < 1$). Das Kosten- Nutzen- Verhältnis liegt

in jedem Fall im Bereich für eine Charakterisierung als kurzfristige Maßnahme. Eine singuläre Variation der Eingangsparameter zeigt, dass die Maßnahme innerhalb des Untersuchungsrahmens unter allen Bedingungen wirtschaftlich ist. Der Grenzwert $K/N = 0,3$ wird innerhalb des gewählten Variationsbereiches nicht erreicht, so dass auch unter günstigen Bedingungen keine Charakterisierung als Sofortmaßnahme vorgenommen werden kann. Damit ist die Maßnahme gegenüber einer Veränderung der Eingangsgrößen relativ robust.

Sollte der Verbraucherpreis, anders als zuvor beschrieben, stärker als der Strompreis steigen, erfolgt eine Verschlechterung des Kosten- Nutzen- Verhältnis. Die Bedingungen hierfür sind ein geringer Anstieg des SPI und ein gleichzeitig sehr starker Anstieg des VPI bei hohen Zinssätzen. In diesem Fall müsste eine Einstufung als abhängige Maßnahme vorgenommen werden.

Weitere Maßnahmen

Als weitere Maßnahmen werden diejenigen Maßnahmen bezeichnet, die im Abschlussbericht des ersten Projektabschnittes als zunächst nicht wirtschaftlich sinnvoll eingestuft wurden.

Maßnahme 5.1.5 (Speicher West - Zusätzliches Befüllungs- und Entleerungspumpwerk)

Für die Maßnahme 5.1.5 mit einem Ausgangs-Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1,66 liegen die kritischen Werte außerhalb des gewählten Untersuchungsbereiches. Damit die Maßnahme wirtschaftlich wird, müsste das Kosten-Nutzen-Verhältnis um ca. 40 % reduziert werden. Dies ist unter realistischen Randbedingungen nicht möglich.

Maßnahme 5.1.6.2 (Belebung - Nachrüstung von elektrischen Vorschaltgeräten für die Walzenbelüfter)

Eine multiple Analyse der Maßnahme 5.1.6.2 zeigt, dass diese bei Zinssätzen zwischen 0,5 % und 3 % als kurzfristig eingestuft werden kann ($\text{Grenz-K/N} < 0,7$). Bei einem Zinssatz von 5,5 % hingegen ist eine Charakterisierung als abhängige Maßnahme vorzunehmen, wobei die kritischen Werte für den Strompreis bei 10,62 % p.a. und für den Verbraucherpreis bei 5,75 % p.a. liegen würden. Diese Größenordnung liegt jedoch außerhalb des gewählten Betrachtungsbereiches. Es ist zu bedenken, dass die Umsetzung nicht im laufenden Betrieb möglich ist [1]. Wird dieser Aspekt berücksichtigt, kann nicht von einer kurzfristigen Maßnahme gesprochen werden.

Nur im Falle eines, im Vergleich zum SPI, stärkeren Anstieg des VPI ist damit zu rechnen, dass die Maßnahme 5.1.6.2 nicht wirtschaftlich ist. Damit ist sie relativ stabil gegenüber einer Verschlechterung der Eingangsbedingungen. Es ist zu beachten, dass bei höheren Zinssätzen schon durch eine geringere Zunahme dieser Parameter eine Verschlechterung des Verhältnisses bewirkt wird.

Maßnahmen 5.1.8 (Belebung Austausch der Rührwerke der Rücklaufschlammdenitrifikation- und Bio-P-Becken)

Da die Maßnahmen 5.1.8 mit einem Kosten-Nutzen-Verhältnisses von 1,08 nahe am Grenzwert von $K/N=1$ liegt, kann bei Zinssätzen zwischen 3 % und 0,5% und einem gegenüber dem Verbrauchpreis stärker ansteigenden Strompreis von einer Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ausgegangen werden. Schon bei minimaler Strompreiserhöhung und unverändertem Zinssatz von 3 % kann ist die Maßnahme wirtschaftlich. Bei höheren Zinssätzen ist eine größere Differenz zwischen SPI und VPI nötig.

Maßnahme 5.1.10 (Filtratwasserbehandlung Verfahrensumstellung auf Deammonifikation, Schaffung der optimalen Bedingungen durch Änderung der Faulschlammkonditionierung)

Bei der Betrachtung einer multiplen Variation der Eingangsparameter fällt auf, dass bei einer realistischen Entwicklung der Strom- und Verbraucherpreis geringe Zinssätze nötig sind, damit die Maßnahme wirtschaftlich wird.

3.4.3 Szenarienanalyse

Die Grundlage der Szenarienanalyse bildet die Definition von drei verschiedenen Varianten für eine mögliche Entwicklung der Eingangsparameter. Indem verschiedene Szenarien erstellt werden, kann ein grober Schwankungsbereich für die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme aufgezeigt werden. Außerdem kann eine Abschätzung der Empfindlichkeit gegenüber einer Veränderung des Strom- und Verbraucherpreises und des Zinssatzes erfolgen. Die für die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme optimale Entwicklung (Best-Case) ist durch einen möglichst geringen Zinssatz und einem SPI, welcher maximal über dem VPI liegt, gekennzeichnet. Eine zu diesem Fall inverse Konstellation ist dem Worst-Case-Szenario zu Grunde gelegt. Die Größenordnung des Betrachtungsbereiches für diese Varianten entspricht den Angaben der gewählten Variation der Werte aus Tabelle 8. Das Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ stellt die realistischste Variante dar und orientiert sich an der tatsächlichen Zeitreihe aus Kapitel 3.1.1. Aus dieser geht hervor, dass über einen Zeitraum von 10 Jahren durchaus von einem stärkeren Anstieg des SPI gegenüber dem VPI in der Größenordnung von rund 2,8 % p.a. ausgegangen werden kann. In Anlehnung an die Angaben der Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) wurde ein Realzinssatz von 3 % für einen realistischen Fall angenommen [44].

Für die Szenarienanalyse ist nur eine gleichzeitige Variation mehrerer Eingangsgrößen, wie sie in Tabelle 10 dargestellt sind, als sinnvoll zu erachten. Die Ist-Werte weichen aufgrund von Rundungsungenauigkeiten leicht von den in der ersten Projektphase ermittelten Werten ab. Es wird deutlich, dass die Höhe der Differenz zwischen SPI und VPI einen erheblichen Einfluss auf die Veränderung der Wirtschaftlichkeit hat. Zudem ist Sensitivität gegenüber einer Variation der Eingangsparameter vom Ist-Wert des Kosten- Nutzen- Verhältnisses abhängig. Maßnahmen, für die höhere Werte ermittelt wurden, reagieren sensibler auf eine Variation der Eingangsparameter.

Parameter	Maßnahme	Ist-Werte 1. Phase	Best-Case	Worst-Case	Mittelwerte Vergangenheit
Zins		3%	0,5%	5,5%	3,00%
SPI			8% p.a.	2% p.a.	4,32% p.a.
VPI			0,5% p.a.	4% p.a.	1,55% p.a.
K/N	S2	0,07	0,04	0,09	0,06
	S3	0,10	0,05	0,14	0,08
	K1	0,07	0,03	0,08	0,05
	K2	0,58	0,29	0,76	0,47
	A1	0,90	0,45	1,17	0,72
	A2	1,00	0,51	1,22	0,78
	5.1.5	1,66	0,84	2,13	1,33
	5.1.6.2	0,82	0,41	1,09	0,67
	5.1.8	1,08	0,54	1,43	0,87
	5.1.10	1,44	0,55	3,38	1,49

Tabelle 10: Szenarienanalyse

Alle Maßnahmen sind im Best-Case-Szenario wirtschaftlich. Die Sofortmaßnahmen (S2 und S3) und die kurzfristigen Maßnahmen (K1 und K2) sind auch im schlechtesten Fall wirtschaftlich. Aufgrund des sehr guten Kosten-Nutzen-Verhältnisses der Sofortmaßnahmen sowie der Maßnahme K1 reicht eine Parametervariation innerhalb des gewählten Untersuchungsbereichs nicht aus, um die Wirtschaftlichkeit maßgeblich zu beeinflussen. Damit ist die Wirtschaftlichkeit der Sofortmaßnahmen unempfindlich gegenüber einer Variation der Eingangsgrößen. Die Maßnahme K2 würde im besten Fall und im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ weiterhin ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Hingegen würde die Maßnahme im Worst-Case nahe an der Grenze zur Unwirtschaftlichkeit liegen. Die abhängigen Maßnahmen A1 und A2 wären im Worst-Case nicht mehr wirtschaftlich und könnten im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ ein Kosten-Nutzen-Verhältnis vorweisen, welches an der Grenze zu einer Charakterisierung als Maßnahme mit einer guten Wirtschaftlichkeit liegt. Im Best-Case könnten für die Maßnahmen jeweils ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnisse und damit eine Einstufung als kurzfristige Maßnahmen erreicht werden. Auch im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ wären die abhängigen Maßnahmen wirtschaftlich, wobei ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegt. Da die Werte nahe an der Grenze zu einem guten Verhältnis liegen, kann eine geringe Parametervariation ausreichen, um eine Einteilung in die Kategorie der kurzfristigen Maßnahmen vorzunehmen. Für die Maßnahmen 5.1.6.2 und 5.1.8 kann im Best-Case-Szenario und im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ eine deutliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit verzeichnet werden, so dass diese sogar den kurzfristigen Maßnahmen zugeordnet werden können. Allerdings sind diese im Worst-Case-Szenario nicht wirtschaftlich. Im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ würde für die Maßnahme 5.1.8 ein deutlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht werden. Unter den veränderten Bedingungen wäre eine Umsetzung zu erwägen. Allerdings ist bei der Bewertung der Maßnahmen 5.1.6.2 und K1 zu berücksichtigen, dass die Umsetzung einen größeren Eingriff in die Abwasserbehandlung mit sich bringt. Aufgrund dieser Nebeneffekte können diese Maßnahmen, trotz des ggf. guten Kosten-Nutzen-Verhältnisses, eine schlechtere Wirtschaftlichkeit erreichen. Die Maßnahme 5.1.10 ist die einzige Maßnahme, für die im Szenario „Mittelwert Vergangenheit“ eine Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit gegenüber den Ausgangswert erfolgt. Allerdings ist für das Best-Case-Szenario eine deutliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zu verzeichnen.

4. Fazit und Ausblick

Durch die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und die Untersuchung eines Carbon Footprint auf Basis einer CO₂-Bilanz konnte eine ökonomische und ökologische Bewertung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Energieeffizienzmaßnahmen erstellt werden. Weiterhin wurde im Hinblick auf die Entwicklung einer zukünftigen Abwasserbehandlungsinfrastruktur ein Zukunftskonzept erstellt und dem Betreiber ein Kalkulationswerkzeug zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe alle geplanten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres Umwelteinflusses untersucht werden können.

Sensitivitätsanalyse und Bewertung der Energieeffizienzmaßnahmen

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfolgte eine differenzierte Untersuchung der in der ersten Projektphase ermittelten Energieeffizienzmaßnahmen. Eine gleichzeitige Variation mehrerer Parameter zeigt, dass vor allem die Konstellation von Strompreisindex und Verbraucherpreisindex einen erheblichen Einfluss auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Maßnahme besitzt. Gemeinsam mit einem günstigen Zinssatz kann bei einer maximal möglichen Differenz zwischen Strompreisindex und Verbraucherpreisindex die beste Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Je ungünstiger dabei das in der ersten Projektphase ermittelte Kosten-Nutzen-Verhältnis ist, desto sensibler ist es gegenüber einer Parametervariation. So sind die abhängigen Maßnahmen sehr empfindlich gegenüber einem im Vergleich zum Strompreisindex stärkeren Anstieg des Verbraucherpreisindex. Allerdings kann eine derartige Konstellation unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung als unwahrscheinlich eingeschätzt werden, sodass sich eine geringe Bedeutung für die Bewertung der jeweiligen Maßnahme ergibt. Eine Betrachtung von drei Szenarien ergab, dass auch die abhängigen Maßnahmen in einem realistischen Fall wirtschaftlich sind. Sie weisen zwar ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf, jedoch liegt dieses relativ nahe an der Schwelle zu einem guten Verhältnis. Ein Austausch der Rührwerke der Rücklaufschlammdenitrifikation- und Bio-P-Becken (Maßnahme 5.1.8) war zunächst als nicht wirtschaftlich eingestuft, kann jedoch unter den Bedingungen des realistischen Szenarios als ökonomisch sinnvoll erachtet werden.

CO₂- Bilanz und Carbon Footprint

Durch die Aufstellung einer CO₂-Bilanz und Erfassung der relevanten Emissionsströme konnte für die Abwasserreinigung der Kläranlage Eversburg ein Treibhausgaspotential von rund 40 kg CO_{2,äq}/(E*a) bzw. 10.500 t CO_{2,äq}/a ermittelt werden. Dabei konnte, unter Berücksichtigung des Umsetzungszeitpunktes und der Entwicklung des deutschen Strommixes, nur ein geringes Einsparpotential der Energieeinsparmaßnahmen von 3 kg CO_{2,äq}/(E*a) bzw. 786 t CO_{2,äq}/a ermittelt werden. Die Emissionen, welche durch den Fremdbezug von elektrischer Energie verursacht werden, liegen mit 15 kg CO_{2,äq}/(E*a) in ähnlicher Größenordnung wie die direkten Methanemissionen. Daraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten, neben der Reduktion des Treibhausgaspotentials durch Umsetzung von Energiesparmaßnahmen, eine Minimierung die Reduktion der direkten Emissionen zu forcieren. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf, da reine Energieeffizienzmaßnahmen in näherer Zukunft ausgeschöpft sein werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Höhe des Carbon Footprint wesentlich von der Auswahl des Emissionsfaktors und Festlegung der Bilanzgrenze bestimmt wird. Durch eine Literaturstudie konnte eine große Schwankungsbreite der angegebenen Emissionsfaktoren und der sich daraus ergebenden Unsicherheiten dargestellt werden. Des Weiteren könnte eine weitergehende Analyse der durch das Kanalnetz in die Abwasserbehandlung eingetragenen Methanmengen wichtige Hinweise zur Freisetzung direkter Emissionen liefern. Für eine exaktere Darstel-

lung des Treibhausgaspotentials der Bau- und Rückbauphase wäre statt Verwendung von Literaturangaben eine umfassende Auswertung der Bauleistungsverzeichnisse nötig.

Zukunftskonzept

In einem weiteren Schritt wurden Maßnahmen und Verfahren identifiziert, die zukünftigen Anforderungen an die Abwasserreinigung und deren Einfluss auf Energieverbrauch und Energieeffizienz Rechnung tragen. So könnten z.B. durch die Umsetzung einer Deammonifikation und der damit verbundenen Reduzierung des Energie- und Betriebsmittelverbrauchs die spezifischen Energiekosten der Filtratwasserbehandlung um 50 % reduziert werden. Aufgrund des geringeren Fremdstrombezugs und der günstigeren CO₂-Bilanz der biologischen Prozesse kann zusätzlich das Treibhausgaspotential der Abwasserreinigung gemindert werden. Allerdings sind bei einer Umsetzung hohe Investitionskosten aufzuwenden. Ein weiterer kritischer Aspekt ist die mangelnde Betriebssicherheit des Verfahrens aufgrund des relativ empfindlichen Prozesses.

Zur Reduktion von im Abwasser enthaltenen Mikroverunreinigungen sind derzeit vor allem oxidative und absorptive Verfahren geeignet. Durch Nutzung einer Regressionsfunktion aus der Literatur [39] konnte ein Vergleich von spezifischen Investitions- und Betriebskosten für eine Verwendung von Ozon und Pulveraktivkohle gezogen werden. Eine Elimination von Mikroschadstoffen mittels Ozon ist trotz geringerer Kosten für die reinen Betriebsmittel aufgrund der hohen Energiebezugskosten, vor allem im Hinblick auf steigende Energiepreise, kritisch zu bewerten. Allerdings kann durch die Verwendung von Ozon eine bessere Reinigungsleistung erzielt werden als durch die Umsetzung einer Aktivkohledosierung. Die CO₂-Emissionen der beiden Verfahren liegen in einer ähnlichen Größenordnung, wobei die Emissionen durch eine Dosierung von Pulveraktivkohle geringfügig höher ausfallen.

Modellerstellung zur Energieeffizienz von Maßnahmen

Mit dem entwickelten Kalkulationswerkzeug wird es dem Anwender ermöglicht abzuschätzen, unter welchen Bedingungen die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme ökonomisch sinnvoll ist. Dabei können jeweils kritische Werte für das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Maßnahme aufgezeigt werden und verschiedene Szenarien untersucht werden. Dieses Kalkulationswerkzeug wurde genutzt, um die zuvor beschriebene Untersuchung der im ersten Projektabschnitt ermittelten Maßnahmen zu validieren. Die vergleichende Darstellung mehrerer Maßnahmen könnte verbessert werden, da die Nutzung des Szenario-Mangers einerseits umständlich ist und andererseits bisher keine parallele graphische Ausgabe implementiert ist.

Als Fazit ist zu nennen, dass sich durch mögliche unterschiedliche Entwicklungen der Zinssätze, der Verbraucherpreise und der Strompreise der vermutete hohe Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit oder Unwirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Energieeffizienz gezeigt hat. Mit dem entwickelten Tool ist es dem Betreiber auch nach Abschluss dieser Untersuchung möglich, den sich verändernden Randbedingungen Rechnung zu tragen und die Kosten-Nutzen-Verhältnisse ständig zu aktualisieren.

5. Literaturverzeichnis

- [1] DAHLEM BERATENDE INGENIEURE; KLEFFMANN, M. (Mitarb.); HILSDORF, J. (Mitarb.); WIMMER, U. (Mitarb.): *Energieeffizienzanalyse Kläranlage Eversburg : Abschlussbericht der 1. Projektphase*. 2013
- [2] DEUTSCHE BUNDESBANK ZINSSTATISTIK: *EZB-Zinssätze*. URL http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_Und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S11BTTEZBZINS.pdf?__blob=publicationFile – Überprüfungsdatum 2015-02-18
- [3] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) : Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis Dezember 2014*. URL <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Erzeugerpreise/ErzeugerpreiseLangeReihen.html> – Überprüfungsdatum 2015-02-18
- [4] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verbraucherpreisindizes für Deutschland : Lange Reihen ab 1948*. URL https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/VerbraucherpreisindexLangeReihenPDF_5611103.pdf?__blob=publicationFile – Überprüfungsdatum 2015-03-03
- [5] BITZ, M.: *Vahlens Kompendium der Betriebswirtschaftslehre*. 5., völlig überarbeitete Auflage
- [6] ISO/TS 14067:2013: *Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation (ISO/TS 14067:2013) : Technische Spezifikation*, 2014
- [7] GREENHOUSE GAS PROTOCOL: *Product life cycle accounting and reporting standard*. Washington, DC, Geneva, Switzerland : World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, 2011
- [8] IPCC: *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. [Geneva?] : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006
- [9] SCHÖNFELD, F.: *Carbon Footprint einer Kläranlage*. Wolfenbüttel, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. 2014
- [10] SCHMUCK, Sebastian: *Entwicklung einer Methodologie zur Quantifizierung der klimarelevanten Emissionen von Abwasseranlagen in Deutschland*. 1. Aufl. Herzogenrath : Shaker, 2013 (Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität GH Essen 42)
- [11] PINNEKAMP, J. (Hrsg.); KÖSTER, S. (Hrsg.); SIEKMANN, M. (Hrsg.); STAUFER, P. (Hrsg.): *Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft*, 2008
- [12] SCHMUCK, S. ; MIETZEL, t. ; WIDMANN, R.: *Ermittlung der klimarelevanten Emissionen von Emschergenossenschaft und Lippeverband*. Abschlussbericht. Essen, 2009. – Abschlussbericht
- [13] GREENHOUSE GAS PROTOCOL: *A corporate accounting and reporting standard*. Rev. ed. Geneva, Switzerland, Washington, DC : World Business Council for Sustainable Development; World Resources Institute, 2004
- [14] MYHRE, G. ; SHINDELL, G. ; BRÉON, F.-M. ; COLLINS, W. ; FUGLESTVEDT, J. ; HUANG, J. ; KOCH, D. ; LAMARQUE, J.-F. ; LEE, D. ; MENDOZA, B. ; NAKAJIMA, T. ; ROBOCK, A. ; STEPHENS, G. ; TAKEMURA, T. ; ZHANG, H.: *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In:

- Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- [15] DIN 1871: *Gasförmige Brennstoffe und sonstige Gase - Dichte und andere volumetrische Größen.* Berlin : Beuth, 1999
- [16] WICHT, H.: *N₂O-Emissionen durch den Betrieb biologischer Kläranlagen.* 1996 (Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig)
- [17] MEMMLER, M. ; SCHREMPF, L. ; HERMANN, S. ; SCHNEIDER, S. ; PABST, J. ; DREHER, M.: *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2013 : Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013.* URL
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanzerneuerbarer-energetraeger-2013> – Überprüfungsdatum 2015-03-31
- [18] PINNEKAMP, Johannes (Hrsg.); KÖSTER, Stephan (Hrsg.); SIEKMANN, Marko (Hrsg.); STAUFER, PHILIPP, 2008 (Hrsg.): *Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft : 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft,* 2008 (410)
- [19] STOWA: *N₂O and CH₄ Emission from Wastewater Collection and Treatment Systems : Technical Report.* Report of the GWRC Research. 2011. – Report of the GWRC Research
- [20] CZEPIEL, Peter M. ; CRILL, Patrick M. ; HARRISS, Robert C.: *Methane emissions from municipal wastewater treatment processes.* In: *Environmental science & technology* 27 (1993), Nr. 12, S. 2472–2477
- [21] LANUV NRW: *Einfluss der Wetterverhältnisse auf das Emissionsverhalten von Kläranlagen.* URL
http://www.lanuv.nrw.de/luft/emissionen/pdf/110107_Kurzfassung_Klaeranlagenbericht.pdf
– Überprüfungsdatum 2014-08-14
- [22] WANG, Jinhe ; ZHANG, Jian ; XIE, Huijun ; QI, Pengyu ; REN, Yangang ; HU, Zhen: *Methane emissions from a full-scale A/A/O wastewater treatment plant.* In: *Bioresource technology* 102 (2011), Nr. 9, S. 5479–5485
- [23] SCHMID, Heidrun ; PUXBAUM, Hans; ELLINGER, Reinhard (Mitarb.); PÜHRINGER, Wolfgang (Mitarb.); WANDL, Gerald (Mitarb.); MÜLLER-RECHBERGER, Heide (Mitarb.); SALAM, Abdus (Mitarb.); KRAXNER, Yolanda Kraxner (Mitarb.); KÖNIG, Georg (Mitarb.) : *EMISSIONEN VON OZONBILDENDEN UND KLIMARELEVANTEN SPURENGASEN AUS KLÄRANLAGEN : Endbericht zum Projekt MA22-4510/99.* Wien, 2000
- [24] KAMPSCHREUR, M. J. ; TAN, N.C.G. ; KLEEREBEZEM, R. ; PICIOREANU, C.: *Effect of Dynamic Process Conditions on Nitrogen Oxides Emission from a Nitrifying Culture.* In: *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008), Nr. 2, S. 429–435
- [25] ATV-DVWK FACHAUSSCHUSS KA-14: *„Emissionen aus Abwasseranlagen“ : DWA-Arbeitsbericht.* 2004
- [26] THÖRN, Marina ; SÖRENSSON, Fred: *Variation of nitrous oxide formation in the denitrification basin in a wastewater treatment plant with nitrogen removal.* In: *Water Research* 30 (1996), Nr. 6, S. 1543–1547
- [27] SCHMUCK, S.: *Entwicklung einer Methodologie zur Quantifizierung der klimarelevanten Emissionen von Abwasseranlagen in Deutschland.* Aachen : Shaker, 2014 (Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen 42)
- [28] TALLEC, G. ; GARNIER, J. ; BILLEN, G. ; GOUSAILLES, M.: *Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation.* In: *Bioresource technology* 99 (2008), Nr. 7, S. 2200–2209

- [29] LANUV NRW; GÄRTNER, A. (Mitarb.); HIRSCHBERGER, R. (Mitarb.): *Einfluss der Wetterverhältnisse auf das Emissionsverhalten von Kläranlagen*. 2012
- [30] FOLEY, Jeffrey ; HAAS, David de ; YUAN, Zhiguo ; LANT, Paul: *Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants*. In: *Water Research* 44 (2010), Nr. 3, S. 831–844
- [31] MCLNNES, G.: *Atmospheric Emission Inventory Guidebook: Volume 1*. 1996
- [32] CZEPIEL, P. ; CRILL, P. ; HARRISS, R.: *Nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment*. In: *Environmental science & technology* 29 (1995), Nr. 9, S. 2352–2356
- [33] PETRA ICHA: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013 (Climate Change, 23/2014)*. Dessau-Roßlau, 2014 (Climate Change)
- [34] BEIER, M., SANDER, M., SCHNEIDER, Y., ROSENWINKEL, K.-H.: *Energieeffiziente Stickstoffelimination - Verfahrensüberblick zur Nitrifikation/Deammonifikation und Auswirkungen auf den Energiebedarf von Kläranlagen*. In: *Korrespondenz Abwasser Abfall* 55 (2008), Nr. 6, S. 671–678
- [35] THÖLE, D. ; SCHMITT, F.: *Großtechnische Betriebserfahrungen zur Deammonifikation mit dem KALDNES-Verfahren auf der Kläranlage Hattingen; in : M.Gröping (Hrsg.) Stickstoffrückbelastung - Stand der Technik 2006 - Erweiterter Tagungsband zur 6. Aachener Tagung, 15./16.11.2006*, 2006
- [36] WETT, B. ; HELL, M.: *Betriebserfahrungen mit dem DEMON-Verfahren zur Deammonifikation von Prozesswasser*. In: *Korrespondenz Abwasser Abfall* 55 (2008), Nr. 3, S. 245–253
- [37] LACKNER, S. ; HORN, H. ; SCHREFF, D.: *Abschlussbericht: 'Pilotvorhaben Deammonifikation'*. 2013
- [38] BEIER, M., REUTER, K., ROSENWINKEL, K.-H.: *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der biologischen Teilstrombehandlung von Schlammwasser*. In: *Abwassertechnik* (1999), 3/4
- [39] HILLENBRAND, T. ; TETTENBORN, F. ; MENGER-KRUG, E. ; MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F. ; FUCHS, S. ; TOSHOVSKI, S. ; KITTLAUS, S. ; METZGER, S. ; TJOENG, I. ; WERMTER, P. ; KERSTING, M. ; ABEGGLEN, C.: *Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikro-schadstoffen in die Gewässer*. 2014 (TEXTE 85/2014)
- [40] BOLLE, F. W. ; PINNEKAMP, J.: *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I, Abschlussbericht - Aktenzeichen: IV-7-042 600 003 J, Im Auftrag von: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, .* 2011
- [41] TÜRK, J. ; DAZIO, M. ; DINKEL, F. ; EBBEN, T. ; HERBST, H. ; HOCHSTRAT, R. ; MADZIELEWSKI, V. ; MATHEJA, A.: *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9) : Gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), AZ IV-7-042 600 0011, Vergabenummer 08/0581*. 2013
- [42] MENNERICH, A.: *Gutachten zur Überprüfung der Anlagenauslegung der biologischen Stufe des Klärwerks Eversburg*. 2014
- [43] HMUELV-HESSEN: *Arbeitshilfe zur Verbesserung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen : Anforderungen an die Planung und Durchführung*. URL https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/HMUELV/11-08-23-arbeitshilfe_energieeffizienz.pdf – Überprüfungsdatum 2015-03-19

-
- [44] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER: *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen : (KVR-Leitlinien)*. 8. überarb. Aufl. Rheinbreitbach : Druckerei Plump, 2012
- [45] VROM: *Protocol 8136 Afvalwater, t.b.v NIR 2008 uitgave maart 2008 6B : CH4 en N2O uit Afvalwater*. Den Haag, 2008

6. Anhang

6.1 Übersicht der Energieeffizienzmaßnahmen

Maßnahme	5.1.5	5.1.6.2	5.1.8	5.1.10
Höhe Investition	78.800 €	124.800 €	123.100 €	890.000 €
Betriebskosten	800	0	0	-70.800
Höhe Stromersparnis	57.500 kWh/a	168.920 kWh/a	126.700 kWh/a	221.630 kWh/a
Jahreskosten	10.038 €	14.630 €	14.431 €	33.535 €
Jahresnutzen	6.038 €	17.737 €	13.304 €	23.271 €
K/N	1,66	0,82	1,08	1,44

Maßnahme	K1	K2	A1	A2
Höhe Investition	5.000 €	52.000 €	600.000 €	870.000 €
Betriebskosten	120	0	1.900	26.176
Höhe Stromersparnis	100.800 kWh/a	100.430 kWh/a	767.480 kWh/a	1.220.520 kWh/a
Jahreskosten	706 €	6.096 €	72.238 €	128.167 €
Jahresnutzen	10.584 €	10.545 €	80.585 €	128.155 €
K/N	0,07	0,58	0,90	1,00

Maßnahme	S1	S2	S3
Höhe Investition	0 €	6.000 €	6.000 €
Betriebskosten	0	200	0
Höhe Stromersparnis	78.580 kWh/a	115.140 kWh/a	64.180 kWh/a
Jahreskosten	0 €	903 €	703 €
Jahresnutzen	8.251 €	12.090 €	6.739 €
K/N	0,00	0,07	0,10

Tabelle 11: Übersicht der im ersten Projektabschnitt ermittelten Maßnahmen

6.2 Entwicklung des dt. Strommix:

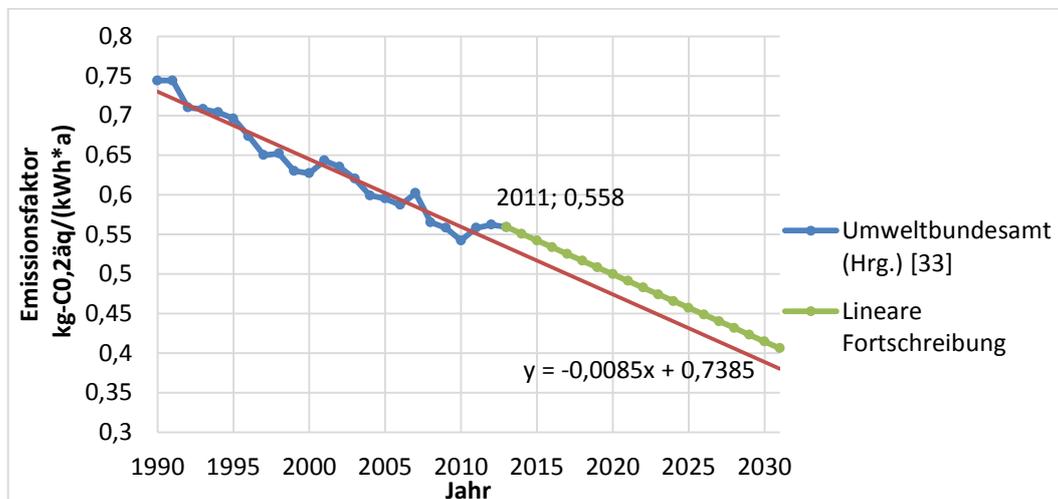


Abb. 24 Fortschreibung des dt. Strommix

6.3 Diagramme zur Sensitivitätsanalyse der Maßnahmen (Kapitel 3.4.2.1)

Maßnahme K2 (Belüftung Biologie - Nachrüstung von Leitblechen für nachträglich installierte Walzenbelüfter)

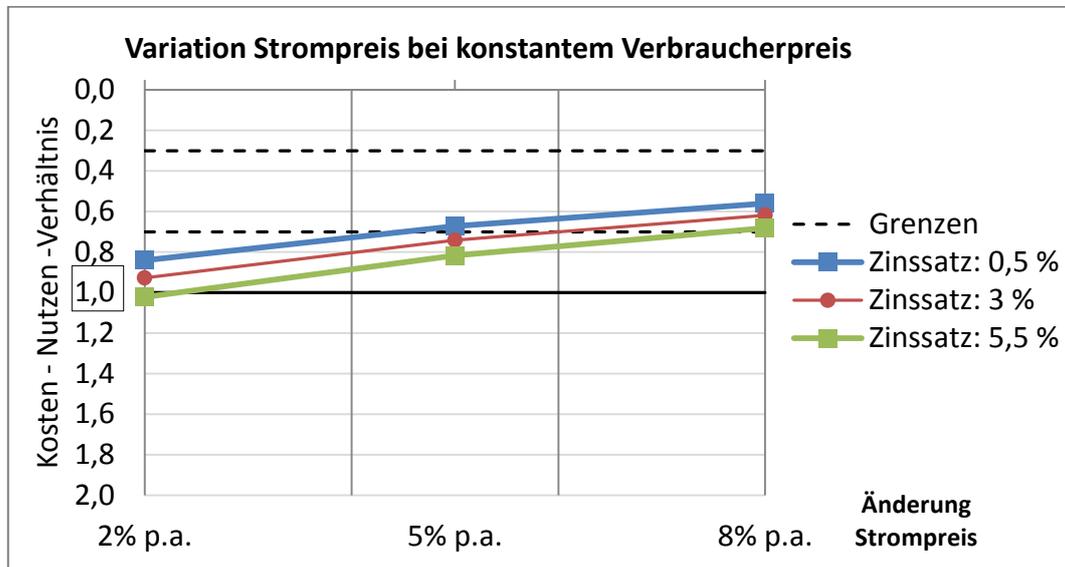


Abb. 25: Änderung Strompreis Maßnahme K2 (VPI = 1,6%)

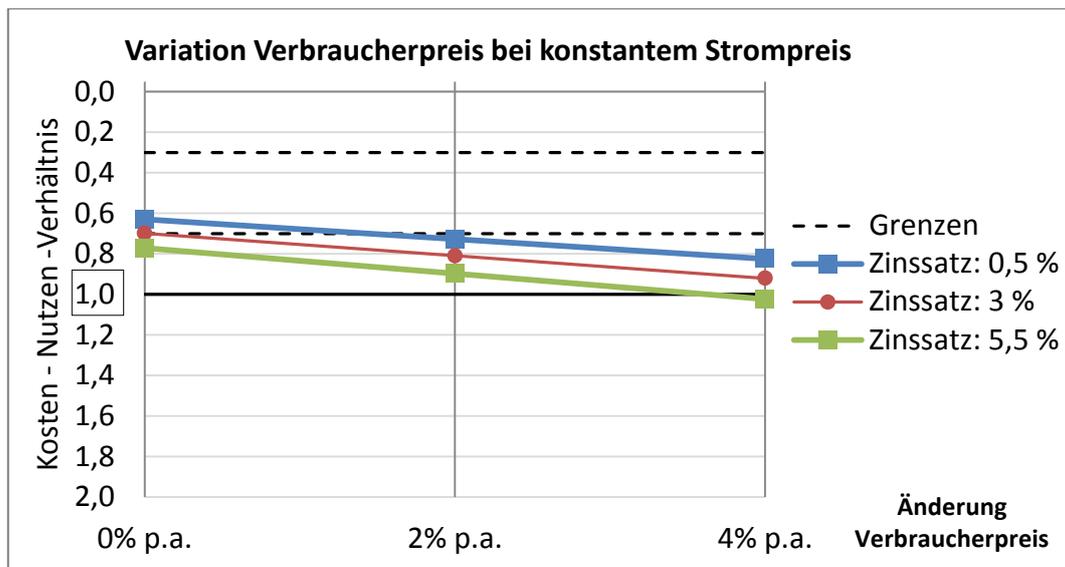


Abb. 26: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme K2 (SPI = 4,3%)

Maßnahme A1 Erneuerung von zwei Blockheizkraftwerken:

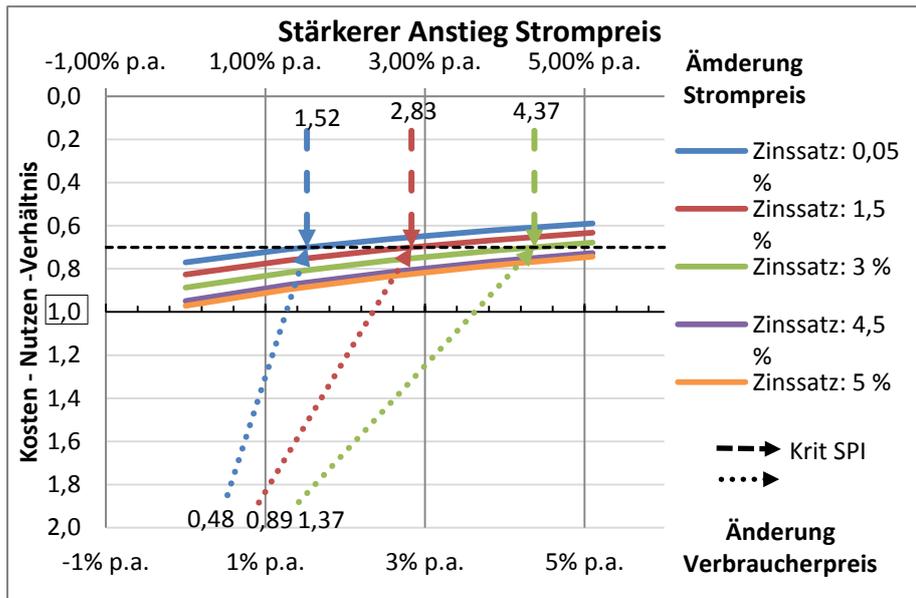


Abb. 27: Gleichzeitige Variation 3 Eingangsgrößen

		Zinssatz							
	Änderung p.a	Index	0,05%	1,50%	3,00%	4,50%	5,00%	Index	Änderung p.a
SPI	0,00%	100	0,77	0,83	0,89	0,95	0,97	100	0,00%
	1,28%	113	0,71	0,76	0,82	0,88	0,90	104	0,40%
	2,55%	126	0,66	0,71	0,76	0,82	0,83	108	0,80%
	3,83%	138	0,62	0,67	0,72	0,77	0,78	112	1,20%
	5,10%	151	0,59	0,63	0,68	0,73	0,74	116	2,54%

Tabelle 12: Gleichzeitige Variation 3 Eingangsgrößen

Maßnahme 5.1.5 (Speicher West - Zusätzliches Befüllungs- und Entleerungspumpwerk):

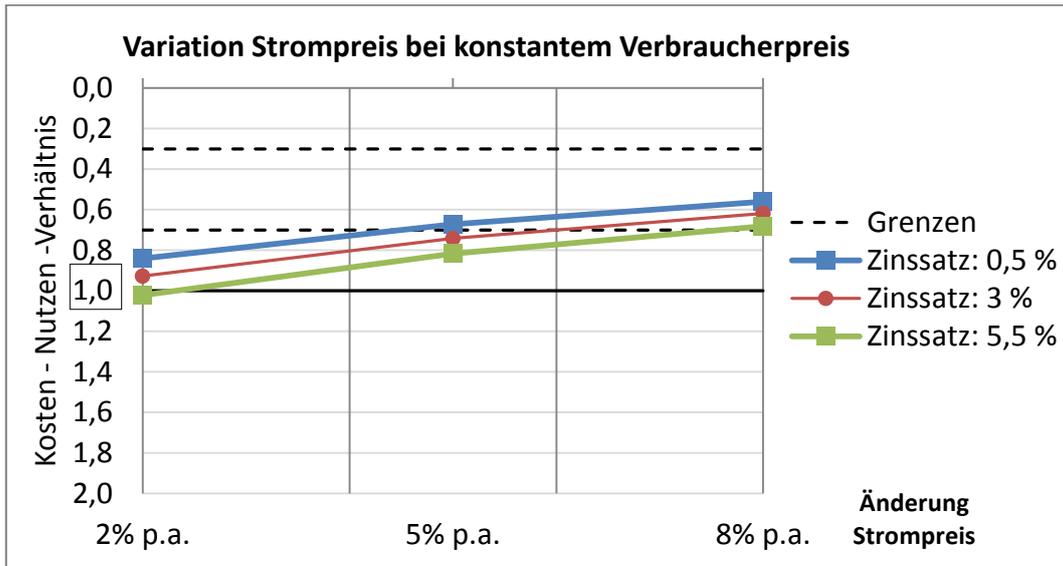


Abb. 28: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.5 (VPI = 1,6%)

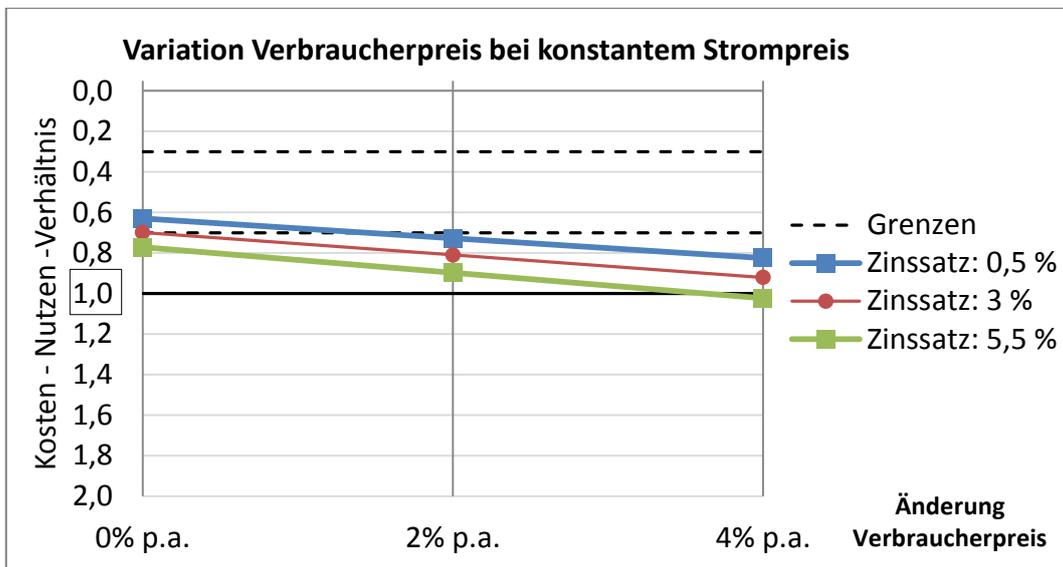


Abb. 29: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.5 (SPI = 4,3%)

Maßnahme 5.1.6.2 Belebung - Nachrüstung von elektrischen Vorschaltgeräten für die Walzenbelüfter:

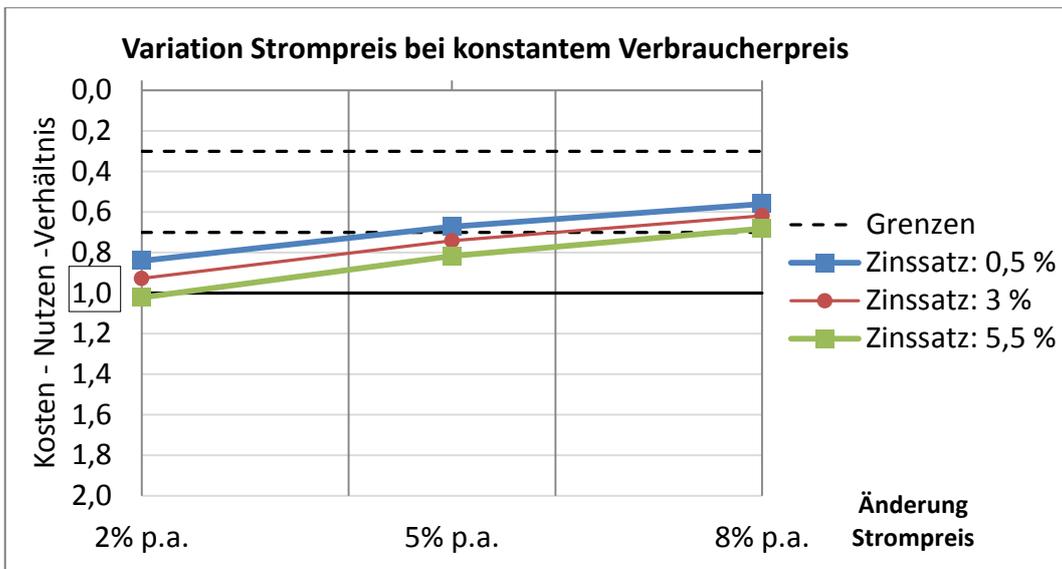


Abb. 30: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.6.2 (VPI = 1,6%)

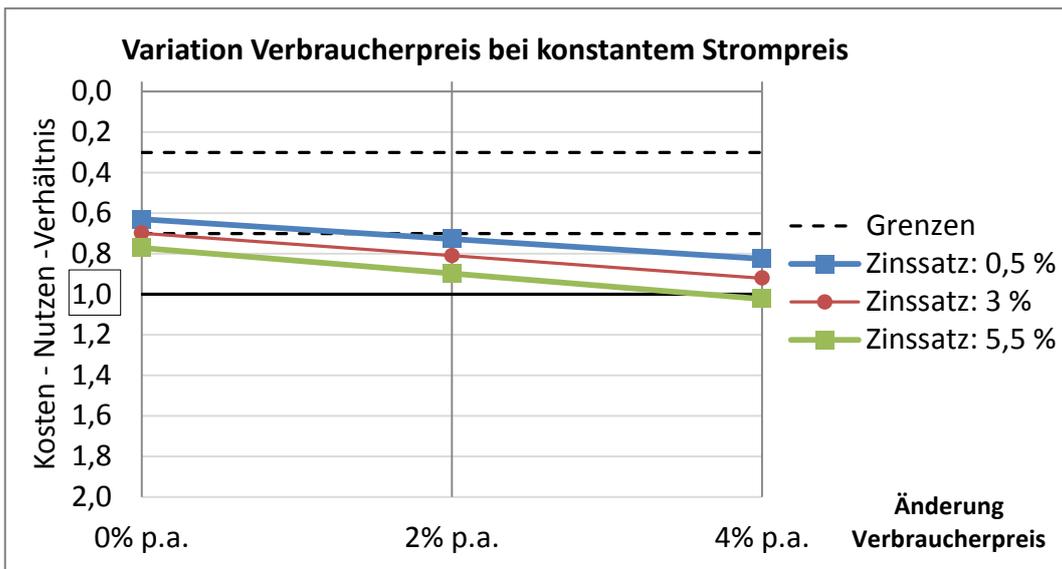


Abb. 31: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.6.2 (SPI = 4,3%)

Maßnahme 5.1.8 Belebung - Austausch der Rührwerke der Rücklaufschlammdenitrifikation- und Bio-P-Becken:

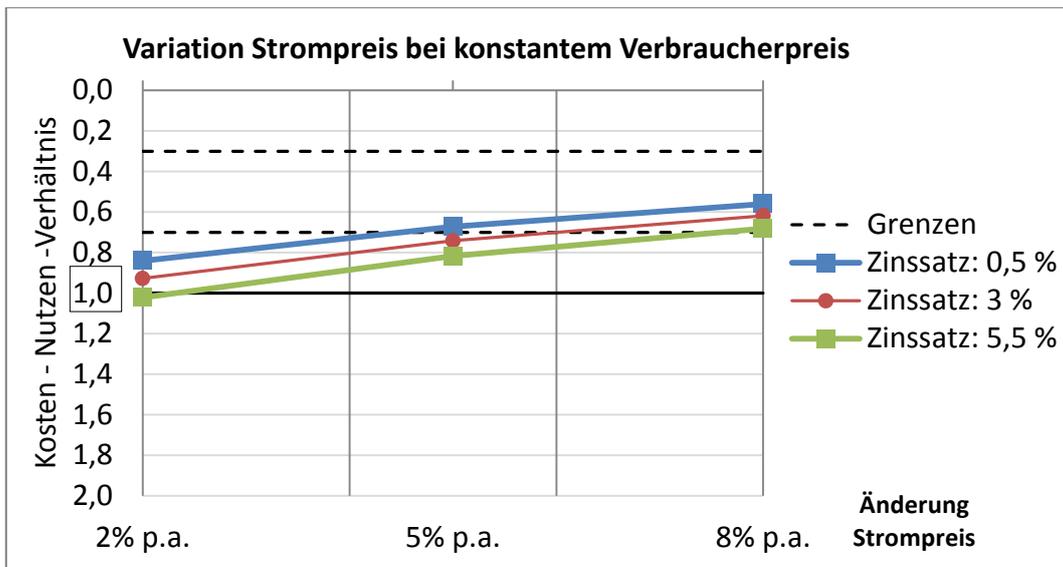


Abb. 32: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.8 (VPI = 1,6%)

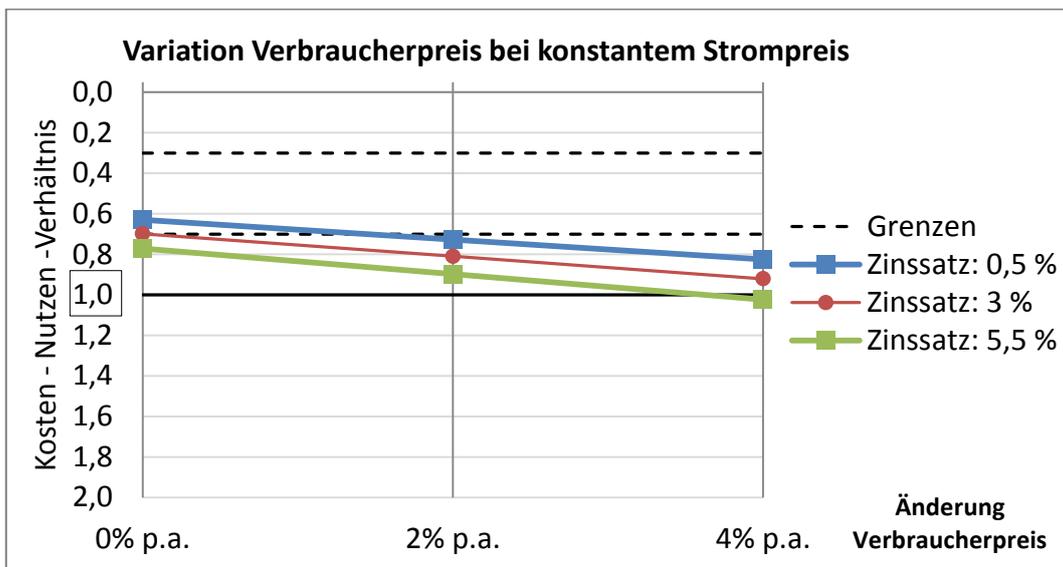


Abb. 33: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.8 (SPI = 4,3%)

Maßnahme 5.1.10 (Filtratwasserbehandlung Verfahrensumstellung auf Deammonifikation, Schaffung der optimalen Bedingungen durch Änderung der Faulschlammkonditionierung):

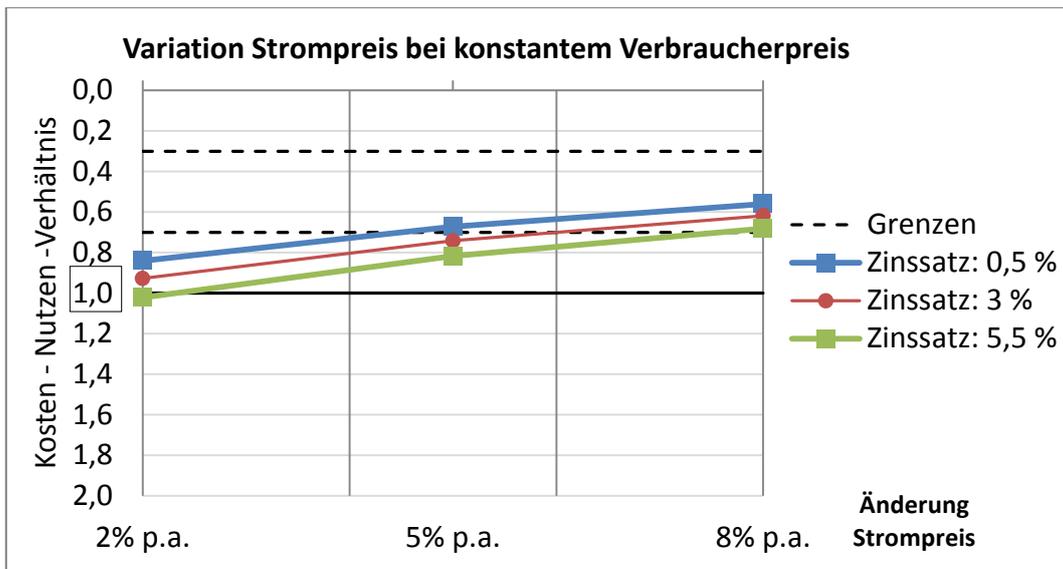


Abb. 34: Änderung Strompreis Maßnahme 5.1.10 (VPI = 1,6%)

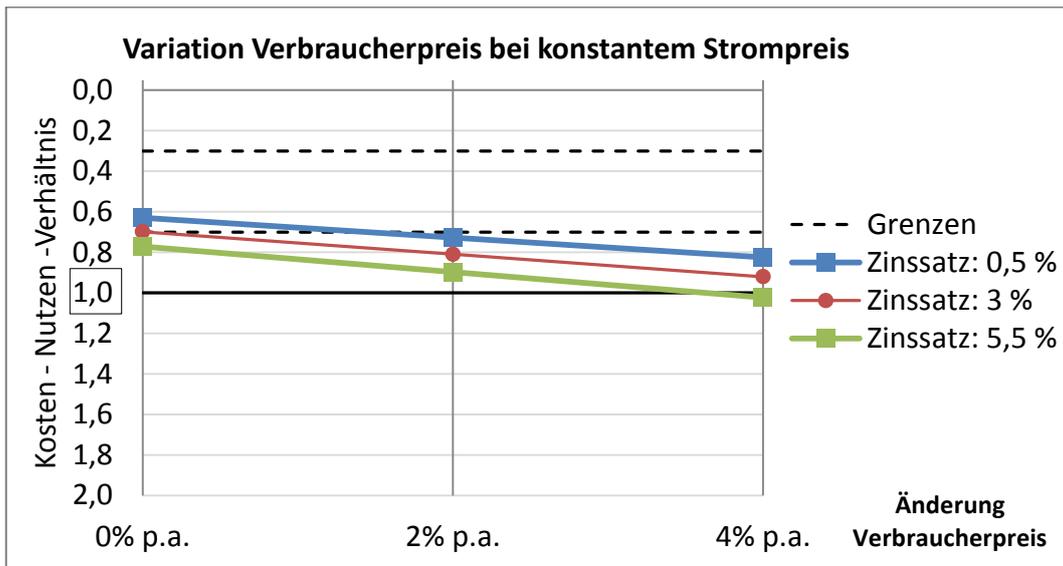


Abb. 35: Änderung Verbraucherpreis Maßnahme 5.1.10 (SPI = 4,3%)

6.4 Übersicht der Literaturstudie bzgl. Faktoren für direkte Emissionen

Ansatz	Emission [g-Ch ₄ /(E*a)]	Treibhausgaspotential [kg-CO ₂ _{räq} /(E*a)]	Literaturgrundlage
IPCC-Methode	5,08	142,28	[8]
Bezug auf Aktivitätsdaten	579,71 ²	16,23	[19]
	386,47 ³	10,82	[19]
	410,63	11,50	[45]
	556,52	15,58	[18]
Literaturvergleich	0,504	14,12	[18]
	0,039	1,09	[20]
	0,1423	3,98	[23]
	0,165	4,62	[21]
	0,011	0,31	[22]
Ansatz	Emission [g-N ₂ O/(E*a)]	Treibhausgaspotential [kg-CO ₂ _{räq} /(E*a)]	Literaturgrundlage

Tabelle 13: Ergebnisse Literaturstudie Methanemissionen

Ansatz	Emission [g-Ch ₄ /(E*a)]	Treibhausgaspotential [kg-CO ₂ _{räq} /(E*a)]	Literaturgrundlage
IPCC-Methode	22,8	0,11	[8]
Bezug Aktivitätsdaten	108,33	28,71	[25]
	32,50	8,61	[27]
	10,83	2,87	[29]
	0,03	0,01	[30]
	16,25	4,31	[17]
	2,71	0,72	[17] ⁴
Literaturvergleich	43,30	11,47	[28]
	2,85	0,76	[31]
	26,00	6,89	[19]
	10,00	2,65	[32]
	20,08	5,32	[33]
	3,20	0,85	[34]

Tabelle 14: Ergebnisse Literaturstudie Lachgasemissionen

² Bezieht sich auf Messungen im Oktober

³ Bezieht sich auf Messungen im Februar

⁴ Nur intermittierende Belüftung betrachtet

6.5 Kostenfunktionen für die vierte Reinigungsstufe

Kostenart	Bereich	Ozonierung	PAK-Dosierung
Investitionskosten	Bautechnik	$y=715 \cdot x^{0,4301}$ 0,48 0,74 0,93	$y=-2 \cdot 10^{(-10)} \cdot x^2 + 0,0829 \cdot x + 389.033$
	Maschinenteknik	$y=1.493 \cdot x^{0,3957}$	$y=3 \cdot 10^{(-10)} \cdot x^2 + 0,0465 \cdot x + 732.806$
	EMSR-Technik	$y=146 \cdot x^{0,5147}$	$y=366 \cdot x^{0,4433}$
	Nebenkosten	$y=91 \cdot x^{0,5438}$	$y=3 \cdot 10^{(-10)} \cdot x^2 + 0,0465 \cdot x + 732.806$
Betriebskosten	Energiekosten	$y=0,0073 \cdot x + 9.322$	$y=0,004 \cdot x - 1.543,7$
	Betriebsmittelkosten	$y=0,0055 \cdot x + 5.803,4$	$y=0,0164 \cdot x + 3.677,7$

Tabelle 15: Kostenfunktionen⁵ [41]

	Ozonierung (Dosis von 2,5 – 15 g/m ³)	PAK – Dosierung (Dosis 5 – 20 g/m ³)
Minimale Emissionen	5,3 – 18,8	3,8 bis 15,9
Maximale Emissionen	9,0 – 27,8	8,0 bis 32,9

Tabelle 16: CO₂-Emissionen [40]

⁵ y= Kosten, x= Abwassermenge