



Aktenzeichen IV-7 – 042 600 003 A

Analyse der Energieeinspar- und Energieoptimierungspotenziale in der industriellen Abwasserreinigung (EnerIndus)

Im Auftrag von:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Projektleitung:



Projektpartner:





Aktenzeichen IV-7 – 042 600 003 A

ABSCHLUSSBERICHT

Analyse der Energieeinspar- und Energieoptimierungspotenziale in der industriellen Abwasserreinigung (EnerIndus)

**Aachen, im Dezember 2011
FiW an der RWTH Aachen**

**Hannover, im Dezember 2011
aqua consult**

Dr.-Ing. F.-W. Bolle

Dipl.-Ing. Roland Lange



**Analyse der Energieeinspar-
und Energieoptimierungspotenziale
in der industriellen Abwasserbeseitigung
(EnerIndus)**

Abschlussbericht

Dezember 2011

gerichtet an das:
**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)**

Projektleitung:

aqua-consult Ingenieur GmbH
Mengendamm 16
D-30177 Hannover

Projektpartner:

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
D-52056 Aachen

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH)
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Welfengarten 1
D-30167 Hannover

Autoren:

Florian Schmidlein	aqua-consult Ingenieur GmbH
Roland Lange	aqua-consult Ingenieur GmbH
Linda Hinken	ISAH, Leibniz Universität Hannover
Sebastian Meier	ISAH, Leibniz Universität Hannover
Dirk Weichgrebe	ISAH, Leibniz Universität Hannover
Karl-Heinz Rosenwinkel	ISAH, Leibniz Universität Hannover

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite:</u>
1	Einleitung 1
2	Methoden und Systemgrenzen 3
2.1	Datenrecherche 3
2.2	Abschätzung von Energieeinsparpotenzialen und Bilanzgrenzen 4
2.3	Dynamische Modellierung 6
2.3.1	Activated Sludge Model No. 3 6
2.3.2	Anaerobic Digestion Model No. 1 7
2.4	CO ₂ -Bilanzierung 8
3	Möglichkeiten der Energieoptimierung / Verfahrenstechnische Potenziale 9
3.1	Allgemeines 9
3.2	Anaerobtechnik 10
3.3	Stickstoffelimination 13
4	Branchenspezifische Analyse der Energieeinspar- und - optimierungspotenziale für die Industrieabwasserreinigung Nordrhein-Westfalens 15
4.1	Ermittlung relevanter Industriebranchen 15
4.2	Ernährungsindustrie 18
4.2.1	Milchverarbeitung 21
4.2.1.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Milchverarbeitenden Industrie 21
4.2.1.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der milchverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen 23
4.2.1.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der milchverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen 25
4.2.2	Erfrischungsgetränke-, Fruchtsaftindustrie und Mineralbrunnen 27
4.2.2.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Fruchtsaftindustrie 27
4.2.2.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Fruchtsaftherstellenden Industrie in Nordrhein-Westfalen 30
4.2.2.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Fruchtsaftherstellenden Industrie Nordrhein-Westfalens 31

4.2.3	Stärkeindustrie	33
4.2.3.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Stärkeindustrie	33
4.2.3.2	Branchenstruktur und Abwassersituation in der Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens	34
4.2.3.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens	35
4.2.4	Brauereien	37
4.2.4.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Brauereien	37
4.2.4.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens	39
4.2.4.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens	40
4.2.5	Zuckerindustrie	42
4.2.5.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Zuckerindustrie	42
4.2.5.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Zuckerindustrie Nordrhein-Westfalens	43
4.2.5.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Zuckerindustrie Nordrhein-Westfalens	44
4.2.6	Hefeindustrie	45
4.2.6.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Hefeindustrie	45
4.2.6.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Hefeindustrie Nordrhein-Westfalens	47
4.2.6.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Hefeindustrie Nordrhein-Westfalens	48
4.2.7	Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe	48
4.2.7.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben	48
4.2.7.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens	51
4.2.7.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein- Westfalens	53
4.2.8	Tierkörperverwertung	55
4.2.8.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Tierkörperverwertungsbetrieben	55
4.2.8.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Tierkörperverwertungsbetriebe Nordrhein-Westfalens	56
4.2.8.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Tierkörperverwertungsbetriebe Nordrhein-Westfalens	58
4.3	Papierindustrie	60
4.3.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Papierindustrie	60
4.3.2	Branchenstruktur und Abwassersituation der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens	62
4.3.3	Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens	64
4.4	Chemische Industrie	65

4.4.1	Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Chemischen Industrie	69
5	Gesamtbetrachtung für Nordrhein-Westfalen	71
6	Dynamische Modellierung und CO_{2e}-Bilanzierung eines Direkteinleiters und eines Indirekteinleiters	75
6.1	Beispiel 1 - Direkteinleiter	75
6.1.1	Datengrundlage und Modellaufbau	75
6.1.1.1	Aerobstufe	75
6.1.1.2	Anaerobstufe	78
6.1.2	Ergebnisse der Modellrechnungen für den aeroben Direkteinleiter	78
6.1.3	Variationsrechnungen zur Energieoptimierung	80
6.1.4	Einbindung einer Anaerobstufe	82
6.2	Beispiel 2 - Indirekteinleiter	84
6.2.1	Datengrundlage	84
6.2.2	Ergebnisse der Modellrechnungen	85
6.2.3	Variationsrechnungen	88
6.3	Bilanzierung der CO ₂ -Emissionen	90
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
8	Literatur	103
9	Abkürzungsverzeichnis	110
10	Verzeichnis der Tabellen	113
11	Verzeichnis der Bilder	115

1 Einleitung

Insgesamt entspricht der Stromverbrauch deutscher Kläranlagen etwa 0,75 % des Gesamtstromverbrauchs bzw. 3,1 % des Stromverbrauchs in Haushalten. Zusätzlich zum Bedarf an elektrischer Energie gibt es einen hohen Wärmebedarf, der aber zu einem großen Teil von den Kläranlagen selbst gedeckt werden kann (Kaste et al., 2006, BMU, 2006, MURL, 1999).

Der Stromverbrauch einer kommunalen Kläranlage macht etwa 1/5 des Elektrizitätsverbrauches der öffentlichen Gebäude und Anlagen aus. Der Stromverbrauch wird von Haberkern et al. (2006) mit durchschnittlich 35 kWh/(EW a) angegeben, in anderen Studien liegt der spezifische Verbrauch in ähnlichen Größenordnungen bei 36-51 kWh/(EW a) bzw. zwischen 30 und 60 kWh/(EW a), im Mittel bei etwa 40 kWh/(EW a) (MURL, 1999, MUFV-RLP, 2007). Maßnahmen zur Einsparung von Energie auf Kläranlagen werden in unterschiedlichen Studien genannt (Thöle et al., 2004, Haberkern et al., 2006, MUFV-RLP, 2007).

In kommunalen Anlagen wird ein erheblicher Anteil (etwa 1/3) des Energiebedarfs durch Einleitungen von Indirekteinleitern aus der Industrie verursacht. Darüber hinaus ist der Energiebedarf auf den industriellen Kläranlagen selbst bei der Abwasservorbehandlung erheblich. Der Energiebedarf von industriellen Anlagen wird in der Regel nur explizit für einzelne Anlagen bestimmt. Branchenspezifische Energiezahlen sowie die Zusammenstellung des Gesamtenergiebedarfs und -potenzials fehlen bisher.

Die Verfahren, die in der industriellen Abwasserreinigung eingesetzt werden, unterscheiden sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Branche und damit von der spezifischen Abwasserzusammensetzung. In oberster Ebene lässt sich zwischen Industrien mit überwiegend organischen oder anorganischen Inhaltsstoffen unterscheiden, weil dieses Kriterium maßgeblichen Einfluss auf die Abwasserbehandlungsstrategie hat. Für die Industrieabwasserreinigung gilt daher noch ausgeprägter als für kommunale Kläranlagen, dass nur bei genauer Kenntnis sämtlicher maßgebender Randbedingungen ein sinnvolles Behandlungskonzept erstellt werden kann.

Viele der industriellen Abwasserbehandlungsanlagen sind vor vielen Jahren errichtet worden und wurden nur dann optimiert, wenn Probleme in der Anlage auftraten. Eine erneute energetische Betrachtung und Bewertung einer Anlage sowie eine Optimierung durch neue Konzepte und Verfahren kann zu erheblichen Energieeinsparungen führen.

Ein häufig geeignetes und angewendetes Konzept zur Reduzierung des Energiebedarfs bei der Behandlung von industriellem Abwasser ist der Einsatz von anaeroben Verfahren. Die anaerobe industrielle Abwasserreinigung findet ihre Anwendung in einer Vielzahl unterschiedlicher Industriezweige (Lebensmittelindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie, Anlagen mit organischem Abwasser, chemische und pharmazeutische Industrie), die durch unterschiedliche Zulaufcharakteristiken (z.B. hohe Stickstoffkonzentrationen, hohe Anteile an Schwefelverbindungen) gekennzeichnet sind. Häufig werden die anaeroben Umsetzungsprozesse zur Behandlung von organisch hoch belastetem Abwasser angewendet. Die Anzahl der zur Industrieabwasserbehandlung eingesetzten Anaerobanlagen ist seit Anfang der 70er Jahre in Deutschland stark gestiegen, die Gesamtzahl liegt bundesweit derzeit bei etwa 250 Anlagen.

In Nordrhein-Westfalen sind sehr viele abwasserintensive Firmen konzentriert. Im Rahmen dieser Studie wurden der Energieverbrauch zur Reinigung von industriellem Abwasser sowie mögliche Energieeinsparpotenziale für ausgewählte Industriebranchen Nordrhein-Westfalens ermittelt. Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf solche Branchen, in denen organisch hoch belastetes Abwasser anfällt und somit Energieeinsparungs- und -erzeugungspotenziale durch eine Verfahrensumstellung (anaerobe Vorbehandlung) in nennenswerte Größenordnung erwartet werden. Auf Grundlage von Betriebsdaten werden diese branchenspezifischen Potenziale (Einsparung elektrischer Energie und Energieerzeugung durch Biogas u. Wärme) ermittelt und aufgezeigt. Diese Abschätzung ermöglicht einen Überblick darüber, in welchen Industriebranchen in Nordrhein-Westfalen derzeit große Energiemengen eingesetzt werden und wo besonders hohe Einsparpotenziale liegen.

Die Untersuchungen haben zum Ziel, dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) eine nach Branchen gegliederte Übersicht über Energieeinsparpotenziale der industriellen Abwasserbehandlung zu geben. Soweit die verfügbare Datenbasis es erlaubt, sind die möglichen Einsparpotenziale in der industriellen Abwasserbehandlung und die aktuellen Energieverbräuche dabei in Relation zu setzen. Diese Wichtung ermöglicht eine sinnvolle Bewertung der Ergebnisse. Dem MKULNV wird hiermit ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem konkrete Projekte in entsprechenden Industriebranchen Nordrhein-Westfalens initiiert werden können und somit signifikante Energie- und Kosteneinsparungen in den jeweiligen Unternehmen erzielt werden können.

2 Methoden und Systemgrenzen

2.1 Datenrecherche

Ein wesentliches Kernstück dieses Forschungsvorhabens stellt die zielführende Auswahl relevanter Industriebranchen und die anschließende Beschreibung der Branchenstruktur innerhalb Nordrhein-Westfalens dar. In weiteren Arbeitsschritten wird die branchenspezifische Abwassersituation beschrieben, um anschließend mögliche Energieeinsparpotenziale darzustellen. Hierzu wurden umfangreiche Literatur- und Datenrecherchen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen basieren maßgeblich auf den nachfolgend aufgelisteten Datenquellen.

- Öffentlich zugängliche, statistische Daten des Landesamtes (IT.NRW), des statistischen Bundesamtes (DeStatis) sowie der Energieeffizienzagentur NRW wurden recherchiert und überwiegend für die Darstellung der Branchenstruktur (Anzahl der Betriebe, Betriebsgrößen, branchenspezifische Produktionszahlen etc.) genutzt. Eine vorliegende Landesstatistik zur nichtöffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2007 (IT.NRW, 2007) wurde als wesentliche Informationsquelle für die Beschreibung der industriellen Abwassersituation verwendet.
 - Aus den vorhandenen und zur Verfügung gestellten Daten des MKULNV und des LANUV wurden insbesondere die umfangreichen Direkt- und Indirekteinleiterdatenbanken NIKLAS-IGL (2010) bzw. INKA (2010) ausgewertet. Diese Datenbanken waren hauptsächlich für die Beschreibung der Abwassersituation der Industriebetriebe in Nordrhein-Westfalen vorgesehen.
 - Die durch die Landes- und Bundesämter sowie durch das Ministerium zur Verfügung gestellten Informationen wurden mit frei verfügbaren, teilweise betriebs- bzw. branchenspezifischen Informationen aus dem Internet ergänzt.
 - Mit dem Ziel die Branchenstrukturen der interessanten Industriebranchen detailliert abbilden zu können wurden weitere Informationen durch Datenanfragen bei den jeweiligen Industrieverbänden recherchiert.
-

- Die gesammelten externen Daten wurden durch intern vorhandene Betriebsdaten (beispielsweise über realisierte Anaerobanlagen) und detaillierten Informationen aus der langjährigen Projekterfahrung der an dem Forschungsprojekt beteiligten Personen und Institutionen entscheidend ergänzt.

In ihrer Gesamtheit ist die so ermittelte Datengrundlage ausreichend, um die Zielvorgabe des Projektes, nämlich einen branchenbezogenen Überblick hinsichtlich der vorhandenen Energieverbräuche in der Industrieabwasserreinigung Nordrhein-Westfalens zu geben und entsprechende Energieeinsparpotenziale aufzuzeigen, zu erfüllen. Es muss an dieser Stelle allerdings darauf hingewiesen werden, dass der ursprünglich gewünschte Detaillierungsgrad auf Grundlage der Datenbasis nur bedingt umgesetzt werden konnte. Insbesondere die Informationen aus den Direkt- bzw. Indirekteinleiterdatenbanken NIKLAS-IGL (2010) und INKA (2010) sind nicht immer ausreichend, um die Abwassersituation wie gewünscht darzustellen. Aufgrund vorherrschender Konkurrenzsituationen unter den in Nordrhein-Westfalen angesiedelten Industrieunternehmen muss darüber hinaus die Weitergabe von betriebsspezifischen Kennwerten (wie Produktionszahlen, Abwasseranfall, Energieeinsatz, etc.) über die Branchenverbände als sehr zurückhaltend bewertet werden. Gleiches gilt auch für die direkte Datenanfrage bei Schlüsselbetrieben.

2.2 Abschätzung von Energieeinsparpotenzialen und Bilanzgrenzen

Neben der Auswahl relevanter Industriebranchen und einer möglichst detaillierten Beschreibung der jeweiligen Branchenstruktur liegt ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Projektes in der Beschreibung der Abwassersituation und der Ermittlung vorhandener Energieeinsparpotenziale. In den meisten Fällen erfolgt hierfür eine Abschätzung der in den jeweiligen Industriebranchen anfallenden Jahresschmutzfracht über landesweite Produktionszahlen und spezifische Abwasser kennwerte aus entsprechenden Schlüsselbetrieben. Aufgrund von branchenspezifischen Randbedingungen wird anschließend abgeschätzt welcher Anteil dieser Jahresschmutzfrachten für den Einsatz anaerober Reinigungsverfahren interessant ist. Bei der überwiegenden Anzahl der betrachteten Industriebranchen wird für diesen Anteil eine Vergleichsbetrachtung von rein aerober Reinigungstechnik gegenüber einer kombinierten Verfahrenstechnik mit anaerober Vorbehandlung durchgeführt, um das vorhandene Energieeinsparpotenzial abzuschätzen.

In der für die Abschätzung der vorhandenen Einsparpotenziale durchgeführten Bilanzierung wird die für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr in die Belüftungsstufe der aeroben, biologischen Abwasserreinigung benötigte Belüftungsenergie für beide Varianten verglichen. Die durch die anaerobe Vorbehandlung deutlich reduzierte organische Belastung einer nachfolgenden aeroben, biologischen Behandlung ist hier der maßgebende Grund für Einsparpotenziale. Ebenfalls dargestellt wird das bei der anaeroben Umsetzung der organischen Schmutzfrachten anfallende Bio- bzw. Methangas. In der Bilanzierung wird die hier mögliche Energieerzeugung bei einer vollständigen Verstromung der Gasmenge berücksichtigt. Bei der energetischen Verwertung des Bio- bzw. Methangases, z.B. mittels BHKW-Anlage, anfallende Abwärme wird in der Energiebilanz nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Wärmemenge direkt auf der Abwasserreinigungsanlage verbraucht wird, beispielsweise für die meistens notwendige Temperierung der Anaerobreaktoren (mesophiler Abbauprozess).

Aussagen über eine mögliche CO₂-Einsparung in den jeweiligen Branchen lassen sich über die ermittelten Energieeinsparpotenziale und entsprechendes CO₂-Äquivalente ableiten. Bei den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Bilanzierungen wurde hierfür gemäß Umwelt-Bundesamt (2010) ein CO₂-Emissionsfaktor von 0,575 kg CO₂/kWh (deutscher Strommix) angenommen.

Die Systemgrenzen des Verfahrensvergleichs umfassen den direkten Betrieb aerober bzw. anaerober Reinigungstechnik. Durch eine veränderte Verfahrensweise entstehende Auswirkungen auf den Rohschlammanfall und dessen Behandlung werden hier energetisch nicht berücksichtigt. Auch die Auswirkungen einer veränderten Behandlung des industriellen Abwasseranteils auf nachgeschaltete kommunale Kläranlagen (bei Indirekteinleitung) lassen sich auf Grundlage der begrenzten Datenmenge in der Bilanzierung rechnerisch nicht vollständig erfassen.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten bzw. aufgezeigten Energieeinsparpotenziale aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Industriebetriebe nicht immer gleichbedeutend mit einer Handlungsnotwendigkeit sind. Vor einer Projektrealisierung sind aus betriebswirtschaftlicher und verfahrenstechnischer Sicht die betriebsspezifischen Randbedingungen vor Ort detailliert zu prüfen.

2.3 Dynamische Modellierung

Die Bilanzrechnungen werden im Rahmen des Projektes durch dynamische Langzeitsimulationen (Abschnitt 0) ergänzt, um Energiebedarf und Energiepotenziale der Kläranlagen bei schwankenden Randbedingungen über einen längeren Zeitraum zu bestimmen und den Ergebnissen der stationären Berechnungen gegenüberzustellen. Durch Variationsrechnungen werden zudem Energiepotenziale unterschiedlicher Verfahrenstechniken und Lastfälle ermittelt. Die eingesetzten Modelle werden im Folgenden kurz erläutert.

2.3.1 Activated Sludge Model No. 3

Für die Abbildung der aeroben Kläranlagen wird das Activated Sludge Model No. 3 (ASM3; Gujer et al., 1999) verwendet, das eine Weiterentwicklung des ASM1 (Activated Sludge Model No. 1) ist. Im ASM3 werden die in Tabelle 1 zusammengefassten Stoffgruppen berücksichtigt und sind die folgenden biologischen Prozesse implementiert:

- Hydrolyse partikulärer organischer Verbindungen
- Heterotrophe Biomasse:
 - Aerobe Speicherung von leicht abbaubarem Substrat
 - Anoxische Speicherung von leicht abbaubarem Substrat
 - Aerobes Wachstum
 - Anoxisches Wachstum
 - Aerobe endogene Atmung
 - Anoxische endogene Atmung
 - Aerobe Veratmung von Speicher-Produkten
 - Anoxische Veratmung von Speicher-Produkten
- Autotrophe Biomasse:
 - Aerobes Wachstum autotropher Biomasse
 - Aerobe endogene Atmung
 - Anoxische endogene Atmung

Das ASM3 bietet eine Modellstruktur sowie einige Standardwerte an, die jedoch entsprechend des Anwendungsfalls angepasst werden müssen. Es wurde in erster Linie zur Simulation von biologischen Verfahren zur Kommunalabwasserreinigung entwickelt. Für eine Anwendung im industriellen Bereich sind ggf. weitere Modifikationen notwendig. Verschiedene Literaturquellen zeigen, dass die Anwendung des Modells auch für Industrieabwasser möglich ist, insbesondere, wenn hohe Konzentrationen an leicht abbaubarem

CSB im Abwasser vorliegen (Koch et al., 2000, Baraňao und Hall, 2004, Pardo et al., 2007).

Tabelle 1: Fraktionen des ASM3

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Einheit
S _O	Sauerstoff, per Definition als negativer CSB	- [g CSB/m ³]
S _S	biologisch leicht abbaubare organische Stoffe	[g CSB/m ³]
S _{NH}	Ammonium-Stickstoff	[g N/m ³]
S _{NO}	Nitrat- und Nitrit-Stickstoff	[g N/m ³]
S _{N2}	molekularer Stickstoff N ₂	[g N/m ³]
S _{ALK}	Alkalinität des Abwassers	[mol HCO ₃ ⁻ /m ³]
S _I	biologisch inerte, gelöste organische Stoffe	[g CSB/m ³]
X _I	biologisch inerte, partikuläre organische Stoffe	[g CSB/m ³]
X _S	biologisch langsam abbaubare, organische Stoffe (gelöst und ungelöst)	[g CSB/m ³]
X _H	heterotrophe Organismen	[g CSB/m ³]
X _{STO}	zellinterne organische Reservestoffe der heterotrophen Organismen	[g CSB/m ³]
X _A	autotrophe Organismen	[g CSB/m ³]
X _{TSS}	partikuläres Material	[g CSB/m ³]

2.3.2

Anaerobic Digestion Model No. 1

2002 wurde das ADM1 (Anaerobic Digestion Model No. 1) der IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Prozesses vorgestellt (Batstone et al., 2002). In diesem Modell sind die wesentlichen biochemischen sowie physikalisch chemischen Umsatzprozesse des anaeroben Abbaus implementiert:

- Desintegration partikulärer zusammengesetzter Stoffe zu Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten
- Hydrolyse zu Einfachzuckern, Aminosäuren und langkettigen Fettsäuren
- Versäuerung von Zuckern und Aminosäuren zu wasserdampf-flüchtigen Fettsäuren
- Umsetzung der Fettsäuren zu Acetat (Acetogenese)
- Umsetzung von Wasserstoff und CO₂ bzw. Acetat zu Methan und CO₂ (Hydrogenotrophe und acetoclastische Methanogenese)

Für die verschiedenen Prozesse sind entsprechende Mikroorganismengruppen implementiert, deren Biomassenzuwachs sowie deren Sterbeprozesse ebenfalls abgebildet werden. Alle Prozesse werden mit Hilfe von algebraischen und Differentialgleichungen beschrieben. Insgesamt werden 32 unterschiedliche Stoffgruppen und 19 unterschiedliche biochemische Prozesse beschrieben.

Eine Zusammenfassung von ADM1-Erweiterungen und Anwendungen machten Batstone et al., 2006. Seit der Vorstellung des Activated Sludge Model No. 1 haben eine Vielzahl von Simulationsstudien die Leistungsfähigkeit der Modellierung der biologischen Abwasserreinigung zur Unterstützung von Planung und Betriebsführung belegt. Die Modellierung und Simulation anaerober Prozesse ist weit weniger verbreitet als die der aeroben biologischen Abwasserbehandlung. Das ADM1 wurde zunächst auch in erster Linie für Faulbehälter angewendet, wurde aber in den vergangenen Jahren auch verstärkt für die Analyse und Optimierung von industriellen Hochleistungsreaktoren genutzt.

2.4 CO₂-Bilanzierung

Für die Darstellung und Bilanzierung der Energieströme und der CO₂-Äquivalente der einzelnen Varianten wurde das Programm UMBERTO eingesetzt, das vom ifu (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH) entwickelt wurde. Die Software lässt sich zur Modellierung, Berechnung, Visualisierung und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen einsetzen. Mit Hilfe der Software lässt sich darstellen, wie viel Energie an den einzelnen Stellen im Prozess eingesetzt wird und damit auch, wo erhebliche Optimierungs- bzw. Einsparpotenziale vorhanden sind.

3 Möglichkeiten der Energieoptimierung / Verfahrenstechnische Potenziale

3.1 Allgemeines

Das übergeordnete Ziel ist, die mit dem Energieverbrauch industrieller Abwasserbehandlung verbundenen Kosten und CO₂-Emissionen zu senken. Die Untersuchungen sollen durch das Aufzeigen möglicher Verfahrenstechniken dazu beitragen, die vorhandenen Energiepotenziale künftig noch besser nutzen zu können. Basis der Betrachtung ist der Stand der Technik in der Industrieabwasserbehandlung.

Energiesparpotenziale in industriellen Abwasserbehandlungsanlagen sind insbesondere zu erwarten

- a) im Einsatz von effizienteren Systemen zur Belüftung, Umwälzung und Gasverwertung
- b) im Einsatz geeigneter und energieeffizienter (Vor-) Behandlungsverfahren und
- c) in der Optimierung und der grundsätzlichen Änderung der Verfahrenstechnik (z. B. Vorschaltung Anaerobstufe zum Kohlenstoffabbau, Deammonifikation zur Stickstoff-Elimination)

Die Verfahren, die in der industriellen Abwasserreinigung eingesetzt werden, unterscheiden sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Branche und damit von der spezifischen Abwasserzusammensetzung. Es lässt sich zwischen Industrien mit überwiegend organischen oder anorganischen Inhaltsstoffen unterscheiden, weil dieses Kriterium maßgeblichen Einfluss auf die Abwasserbehandlungsstrategie hat.

Viele der industriellen Abwasserbehandlungsanlagen sind vor Jahren errichtet worden und wurden nur dann optimiert, wenn Probleme in der Anlage auftraten. Eine erneute energetische Betrachtung und Bewertung einer vorhandenen Anlage sowie eine Optimierung durch neue Konzepte und Verfahren kann zu erheblichen Energieeinsparungen führen.

Ein erheblicher Energiebedarf in der Abwasserbehandlung resultiert aus der Belüftung, die zur biologischen Behandlung von organisch belastetem Abwasser eingesetzt wird. Übliche Verfahren und Methoden sind die Folgenden:

In indirekt einleitenden Betrieben werden häufig **M-A-Becken (Misch- und Ausgleichsbecken)** eingesetzt, die der Konzentrationsvermischung und dem Mengenausgleich (Speicher) dienen. Besonders in der Lebensmittelindustrie werden diese Becken belüftet, um z.B. Geruchsemissionen zu vermindern, so dass dort bereits ein biologischer Teilabbau stattfindet. Die tatsächliche Umsetzung der organischen Inhaltstoffe findet in der nachgeschalteten kommunalen Abwasserbehandlungsanlage statt und führt dort zu einem erheblichen Energiebedarf. Mögliche Energieeinsparpotenziale liegen hier in einer energieeffizienten Behandlung der höher konzentrierten Industrieabwasserströme bereits bei den indirekt einleitenden Betrieben.

In vielen Industriebetrieben mit organisch belastetem Abwasser und eigener Abwasserbehandlung werden **aerobe Verfahren** eingesetzt. Hier wurden in der Vergangenheit auch eine Reihe von Sonderverfahren entwickelt, um den Ansprüchen von speziellem Industrieabwasser und standortspezifischen Randbedingungen (z.B. geringer verfügbarer Platz, besondere Anforderungen an Geruchsemissionen) gerecht zu werden. Dazu zählen z.B. Belebungsverfahren mit Reinsauerstoff, Belebungsverfahren mit besonderer Tiefe und Form der Reaktoren (Verfahren mit großer Beckentiefe, Biohoch-Reaktor, Bayer-Turmbiologie, Deep-Shaft), Verfahren im Batch-Betrieb (SBR-Verfahren) und ohne konventionelle Nachklärung (Flotationsverfahren, Membranverfahren). Viele dieser Anlagen entsprechen heute hinsichtlich ihrer technischen Ausrüstung nicht mehr dem Stand der Technik. Insbesondere für die Behandlung von organisch hoch belastetem Abwasser bieten sich moderne anaerobe Verfahren an. Auch für die Behandlung von Abwasser mit hohen Stickstoffkonzentrationen wurden bereits neue Verfahren entwickelt. Verfahren wie Nitrifikation/ Denitrifikation oder Deammonifikation haben einen geringeren Sauerstoff- und damit auch einen geringeren Energiebedarf. Diese Verfahren sind in einigen Anlagen großtechnisch umgesetzt. An Optimierungen wird weiter geforscht.

3.2 Anaerobtechnik

Ein häufig geeignetes und angewendetes Konzept zur Reduzierung des Energiebedarfs bei der Behandlung von industriellem Abwasser ist der Einsatz von **anaeroben Verfahren**. Die anaerobe industrielle Abwasserreinigung findet ihre Anwendung in einer Vielzahl unterschiedlicher Industriezweige (Lebensmittelindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie, Anlagen mit organisch belastetem Abwasser, chemische und pharmazeutische Industrie), die durch unterschiedliche Zulaufcharakteristiken (z.B. Kampagnebetriebe, hohe Anteile an Kohlenstoffverbindungen, schwankende Temperaturen und Pufferkapazitäten) gekennzeichnet sind. Häufig werden die anaeroben Umsetzungspro-

zesse zur Behandlung von organisch hoch belastetem Abwasser angewendet. Anaerobe Abbauprozesse können im Grunde bei jeder Substratkonzentration stattfinden. Bei geringen Konzentrationen und Abwassertemperaturen ist jedoch die Wirtschaftlichkeit häufig nicht mehr gegeben. Die Anzahl an Anaerobanlagen zur Industrieabwasserbehandlung ist seit Anfang der 70er Jahre in Deutschland stark gestiegen, die Gesamtzahl liegt derzeit bei etwa 250 Anlagen (DWA-IG 5.1, 2009).

Beim Einsatz anaerober Verfahren werden die im Abwasser vorhandenen organischen Inhaltstoffe zu Biogas umgesetzt, welches nach Möglichkeit direkt im Betrieb zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt wird. Zusätzlich wird Belüftungsenergie eingespart und die in der Aerobstufe produzierte Schlammmenge reduziert. Dadurch sind weitere Energie- und Kosteneinsparungen im Bereich der Schlammbehandlung (Investition, Energie, Chemikalien, Personaleinsatz) und der Schlamm Entsorgung (inkl. Transportaufwand) zu erreichen. Die Größenordnung der möglichen Energieeinsparung durch die Anwendung der Anaerobtechnik im Vergleich zur Aerobtechnik ist von der Abwasserzusammensetzung und von produktionspezifischen Randbedingungen der Branche bzw. des Betriebes abhängig. In den Branchenbetrachtungen werden in diesem Bericht entsprechende Angaben zu den erreichbaren Einsparpotenzialen gemacht.

Eine Anaerobstufe kann nicht als alleinige biologische Behandlungsstufe zur Direkteinleitung eingesetzt werden, da sie in der Regel nicht die gleichen Werte im biologischen Abbau erzielt wie eine aerobe Belebungsstufe. Es ist deshalb verfahrenstechnisch hier immer eine nachgeschaltete Aerobstufe vorzusehen. Auch beim Einsatz der Anaerobtechnik zur Abwasservorbehandlung, also bei einer Indirekteinleitung, ist vor der Überleitung in die öffentliche Kanalisation immer mindestens eine ausreichende Nachbelüftung des Ablaufs der Anaerobstufe notwendig, um Geruchsstoffe zu eliminieren und im Ablauf enthaltene anaerobe Bakterien zu inaktivieren. Der hierfür notwendige Energieeintrag wurde bei den betrachteten Variantenuntersuchungen dieses Berichtes berücksichtigt.

Es ist zu beachten, dass im Industrieabwasser Nährstoffe und Spurenelemente in unzureichenden Konzentrationen vorliegen können. Dies kann dann zu Mangelerscheinungen und Hemmungen des anaeroben Abbaus führen. Die anaeroben Abbauvorgänge können zudem durch unterschiedliche Randbedingungen negativ beeinflusst oder gehemmt werden (z. B. Schwankungen in Konzentration und Menge, Hemmstoffe wie Schwefel, Stickstoff, Schwermetall, Kalzium im Zulauf).

Beim Einsatz von anaeroben Verfahren ist zu prüfen, wie sich eine solche Stufe auf erforderliche nachgeschaltete Verfahrensstufen auswirkt. So kann z. B. das Fehlen leicht abbaubarer Kohlenstoffe zu Problemen bei der Denitrifikation und damit zu erhöhten Nitratkonzentrationen im Ablauf führen. Hier ist es erforderlich, in Abhängigkeit von den Zulauf-Konzentrationen und den Einleitorderungen im Einzelfall das Verfahrenskonzept der industriellen Abwasservorbehandlung und den Betrieb der kommunalen Kläranlage aufeinander abzustimmen und zu optimieren. Diese genannten Aspekte sind im Rahmen der Konzepterstellung und der Planung zu prüfen und zu beachten.

Für die anaerobe Abwasserbehandlung wurden verschiedene Reaktorsysteme entwickelt, die sich in der Regel im Verfahren des Biomassenrückhaltes unterscheiden und deren Einsatz von der Abwassermatrix (z.B. Feststoffkonzentration, CSB, Substratzusammensetzung) abhängig ist. Am häufigsten eingesetzt werden der UASB-Reaktor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor) und entsprechende Hochleistungssysteme (z. B. EGSB-Reaktoren, Expanded Granular Sludge Blanket-Reaktoren).

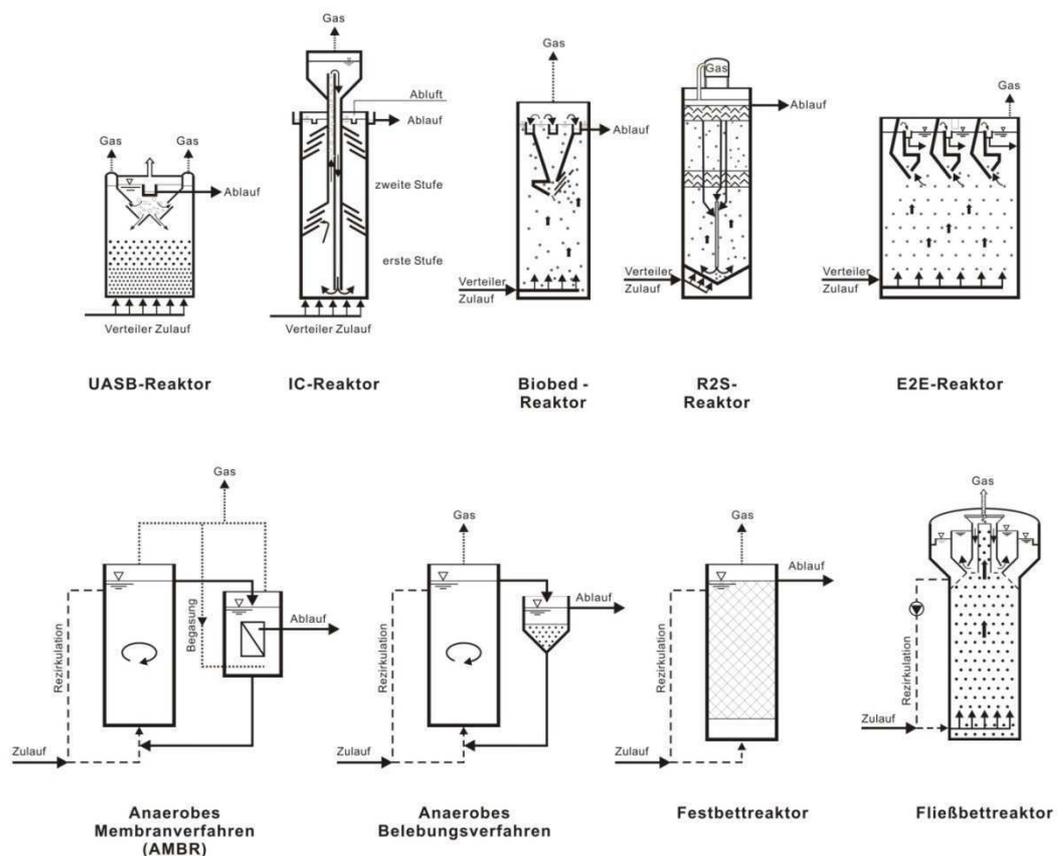


Bild 1: Grundtypen anaerober Reaktoren (nach Seyfried (1988), erweitert)

Als Methan fällt bei der anaeroben Behandlung für einen kg CSB abgebaut eine Methangasmenge von ca. $0,32 \text{ m}^3$ mit einem Brennwert von ca. 10 kWh/m^3 Methan an. Der Methangehalt des Biogases ist im Wesentlichen abhängig von der Substratzusammensetzung.

Die Verwertung des erzeugten Biogases erfolgt in der Regel in Gaskesseln oder in Blockheizkraftwerken (BHKW). Es ist im Einzelfall zu prüfen, welcher Verwertungsweg wirtschaftlicher ist. Neben der Stromerzeugung ist die Nutzung der enthaltenen thermischen Energie wesentlicher Faktor zur Erhöhung der Gesamteffizienz der Biogasnutzung. Alternativ zum Einsatz von BHKW-Modulen ist auf den möglichen Einsatz von Mikrogasturbinen hinzuweisen, die zwar über einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad verfügen, dafür aber einen höheren thermischen Wirkungsgrad besitzen und die Wärme auf einem deutlich höheren Temperaturniveau zur Verfügung stellen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Gas auf Erdgasqualität zu reinigen und ins öffentliche Gasnetz einzuspeisen. Eine Wirtschaftlichkeit dieses Konzeptes ist derzeit nur für große Biogasmengen gegeben.

3.3 Stickstoffelimination

In kommunalen und industriellen Kläranlagen wird Stickstoff bisher hauptsächlich über die klassische Prozesskombination Nitrifikation/ Denitrifikation eliminiert, wobei die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahrenskombination im Wesentlichen durch die Bereitstellung eines ausreichenden Beckenvolumens sowie durch den Energieverbrauch für die Sauerstoffversorgung (Nitrifikation) und die Umwälzung (Denitrifikation) geprägt ist. Wenn das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff eine hinreichende Denitrifikation nicht zulässt, ist bei konventionellen Verfahren zusätzlich eine externe C-Quelle zu dosieren (Hartwig et al., 2008).

Eine Reduzierung des Energieaufwandes und der ggf. notwendigen externen C-Dosierung ist durch Einsatz der Verfahren der **Nitritation/Denitritation** und der **Deammonifikation** möglich (Hartwig et al., 2008) und (Sander et al., 2010).

Beide Verfahren sind großtechnisch erprobt. Da bei der Denitrifikation im Gegensatz zur Denitrifikation nur 2/3 und bei der Deammonifikation gar kein Kohlenstoff zur Umwandlung des Stickstoffs zu N₂-Gas benötigt wird, bieten sich nicht nur direkte, sondern auch indirekte energetische Vorteile durch die weitgehende Ausnutzung vorhandenen Kohlenstoffs zur Biogasbildung. Die Anwendung vorgeschalteter Anaerobverfahren in Kombination mit innovativen Stickstoffeliminationsprozessen ermöglicht so, dass sich Energieerzeugung durch Biogasbildung mit geringerer CO₂-Emission koppeln lässt (Hartwig et al., 2008).

Eine Gegenüberstellung der wesentlichen Kennzahlen der Verfahren ergibt folgendes Bild:

- konventionelle Nitrifikation und Denitrifikation
 - Energiebedarf für die vollständige Ammoniumoxydation (NH₄-N → NO₃-N), ca. 3,6 kWh/kg N
 - Bedarf an externer C-Quelle für die Denitrifikation (NO₃-N → N₂), ca. 5,5 kg leicht abbaubarer CSB/kg N.

 - Nitrifikation/ Denitrifikation
 - Energiebedarf: ca. 60 % der konventionellen Nitrifikation und Denitrifikation
 - Bedarf an C-Quelle: ca. 75 %

 - Deammonifikation (direkte Ammoniumumwandlung in N₂)
 - Energiebedarf reduziert auf ca. 1,5 kWh/kg N
 - eine externe C-Quelle kann gänzlich entfallen.
-

4 Branchenspezifische Analyse der Energieeinspar- und -optimierungspotenziale für die Industrieabwasserreinigung Nordrhein-Westfalens

4.1 Ermittlung relevanter Industriebranchen

Für das Jahr 2007 sind in Nordrhein-Westfalen 1.852 Betriebe verzeichnet, die Wasser gewinnen oder die einen Fremdbezug an Wasser von mindestens 10.000 m³/a aufweisen bzw. die Wasser oder Abwasser in Gewässer einleiten (IT.NRW, 2007). In diesen 1.852 Betrieben fällt eine nichtöffentlich beseitigte Abwassermenge von 4.570 Mio. m³/a an (vgl. Bild 2). Bei einem wesentlichen Anteil dieser Wassermenge handelt es sich um Kühlwasser (3.703 Mio. m³/a), sodass sich die tatsächliche Abwassermenge auf 866 Mio. m³ pro Jahr reduziert.

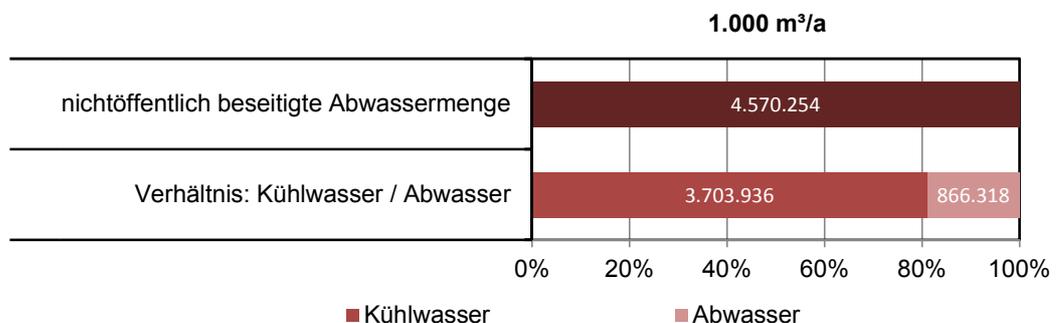


Bild 2: Nichtöffentlich beseitigte Abwassermenge in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2007 (IT.NRW, 2007)

Werden die 1.852 erfassten Betriebe nach Wirtschaftszweigen klassifiziert (verwendeter Klassifizierungsschlüssel WZ 2003), lassen sich bei einer reinen Betrachtung der oben dargestellten, anfallenden Abwassermenge in Nordrhein-Westfalen 9 Wirtschaftszweige von besonderer Relevanz erkennen. In diesen Wirtschaftszweigen fällt jeweils mindestens ein Prozent der Abwassermenge von 866 Mio. m³/d an. Zusätzlich anfallende Kühlwassermengen werden hier nicht betrachtet. In Bild 3 sind die hinsichtlich der anfallenden Abwassermenge relevanten Wirtschaftszweige dargestellt.

Von den 2007 insgesamt erfassten 1.852 Betrieben lassen sich 1.036 Betriebe diesen 9 Wirtschaftszweigen zuordnen (vgl. Bild 4). Dabei ist innerhalb des Wirtschaftszweigs „Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung“ trotz einer vergleichsweise geringen Abwassermenge von ca. 34,7 Mio. m³/a mit 284 Betrieben bei weitem die größte Anzahl von Betrieben verzeichnet.

Die vorab dargestellten, auf Grundlage des Umweltstatistikgesetz erhobenen und im Statistischen Bericht „Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen 2007“ durch IT.NRW (2007) veröffentlichten Daten lassen zusätzlich zu den Mengenbetrachtungen keine fundierte Aussage über die tatsächlich anfallenden Schmutzfrachten in den 1.852 Betrieben bzw. in den einzelnen Wirtschaftszweigen zu.

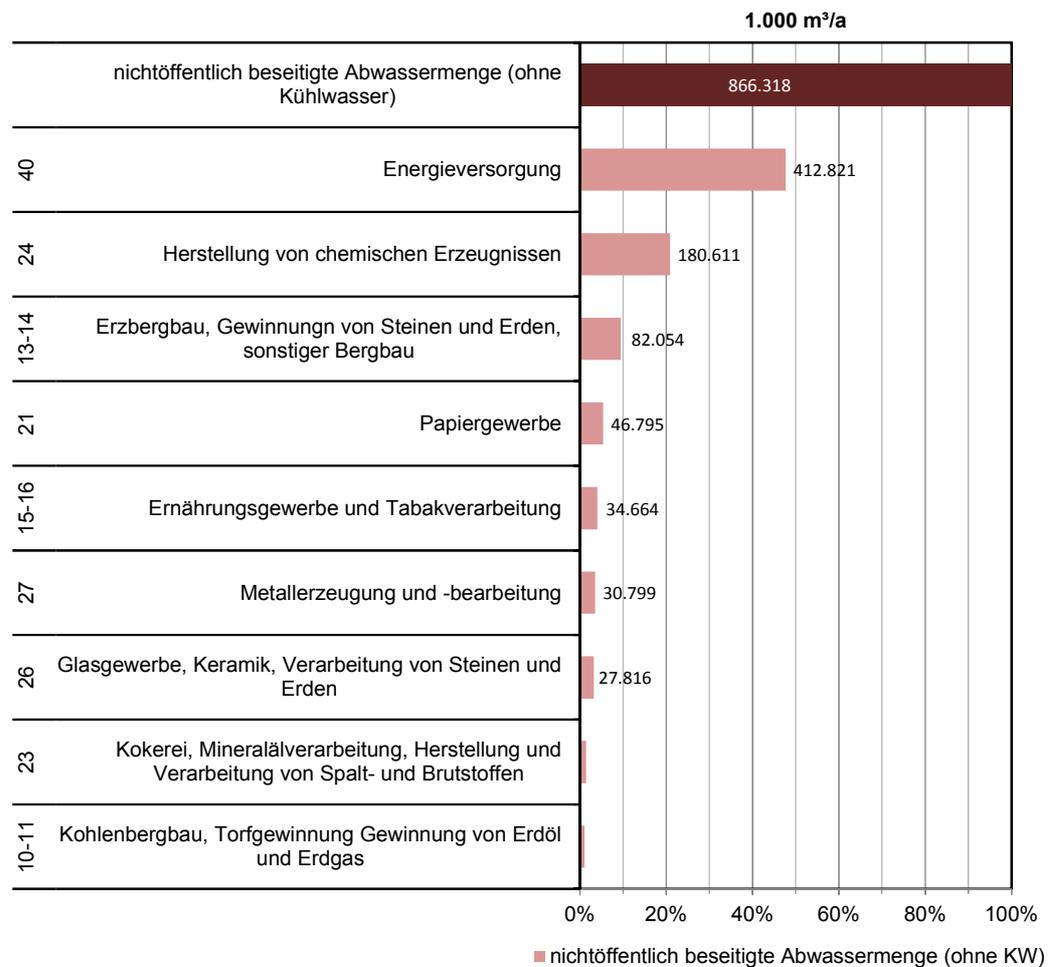


Bild 3: Nichtöffentlich beseitigte Abwassermenge in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2007, nach Wirtschaftszweigen geordnet (IT.NRW, 2007)

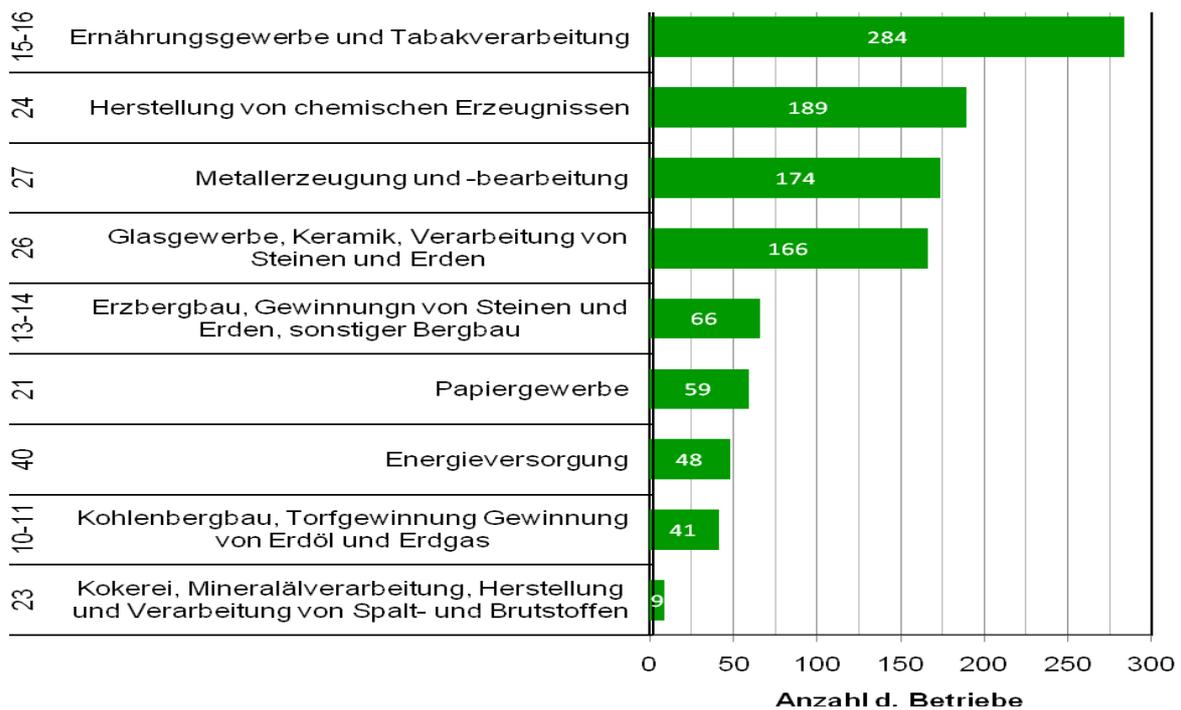


Bild 4: Betriebe, die Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (2007), nach Wirtschaftszweigen geordnet (IT.NRW, 2007)

Wie bereits in Kapitel 0 erläutert, sind allerdings die Abwasserzusammensetzung und insbesondere das Ausmaß der organischen Belastung für eine Beurteilung möglicher Energieeinsparpotenziale beispielsweise durch die Umstellung auf effiziente anaerobe Reinigungsverfahren von wesentlicher Bedeutung.

Auch ohne statistisch erfasste Daten sind von den 9 hinsichtlich der nichtöffentlich beseitigten Abwassermenge relevanten Wirtschaftszweigen unter Berücksichtigung der Abwasserqualität bzw. der vorhandenen organischen Schmutzfrachten einige Wirtschaftszweige besonders hervorzuheben. Hierzu zählen insbesondere die „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“, das „Papiergewerbe“ und das „Ernährungsgewerbe und die Tabakverarbeitung“.

4.2 Ernährungsindustrie

Für Nordrhein-Westfalen sind für das Jahr 2007 unter der Klassifizierung „Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung“ 284 Betriebe statistisch erfasst, bei denen insgesamt eine Abwassermenge von ca. 34,7 Mio. m³/a anfällt. Laut statistischem Bericht (IT.NRW, 2007) verfügen von diesen 114 über eine betriebliche Abwasserreinigungsanlage (vgl. Bild 5), wobei auf der vorhandenen Datenbasis keine weitere technische Spezifikation möglich ist.

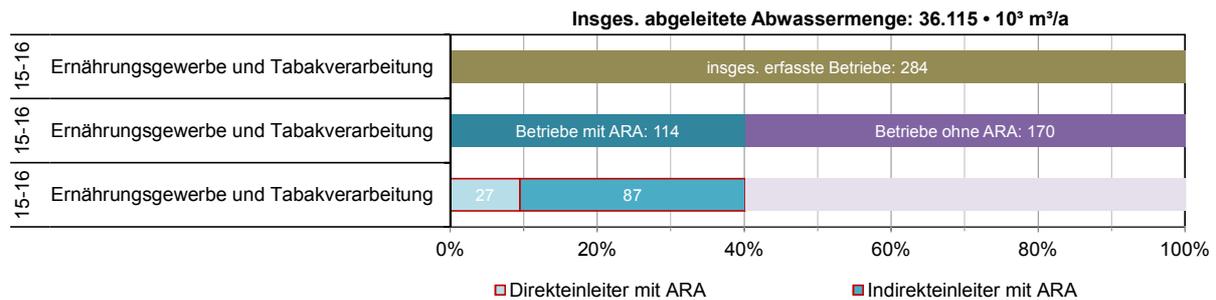


Bild 5: Anzahl der Betriebe, die im Wirtschaftszweig Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (IT.NRW, 2007); inklusive Unterscheidung zwischen Betrieben mit und ohne Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

Von den 114 Betrieben mit eigener Abwasserreinigungsanlage sind für das Jahr 2007 in dem statistischen Bericht 27 als direkteinleitende und 87 als indirekteinleitende Betriebe verzeichnet. Von der in diesem Wirtschaftszweig insgesamt anfallenden Abwassermenge von ca. 36 Mio. m³/a werden etwa 20 % direkt nach einer Behandlung in einer betrieblichen Abwasserreinigungsanlage eingeleitet. Etwa 35 % der Gesamtwassermenge werden nach einer betrieblichen Vorbehandlung indirekt eingeleitet und nur ca. 45 % der Gesamtwassermenge werden ohne betriebliche Abwasserbehandlung indirekt über die kommunalen Kläranlagen abgegeben (vgl. Bild 6).

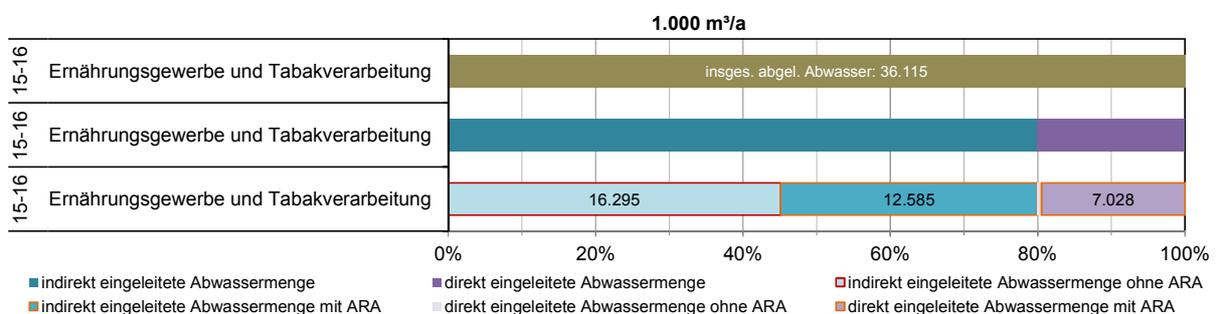


Bild 6: Im Wirtschaftszweig Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung in Nordrhein-Westfalen nicht öffentlich beseitigte Abwassermenge für das Jahr 2007; inklusive Unterscheidung zwischen direkt und indirekt eingeleiteter Wassermenge (IT.NRW, 2007)

Für eine spezifischere Betrachtung der einzelnen, innerhalb des Wirtschaftszweiges „Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung“ zusammengefassten Branchen der Lebensmittelindustrie eignet sich eine Gliederung anhand der zugehörigen Anhänge nach Abwasserverordnung (AbwV, 2004). Die 14 nachfolgend aufgelisteten Anhänge bzw. Industriebranchen sind hier inbegriffen:

- Anhang 3: Milchverarbeitung
- Anhang 4: Ölsaatenaufbereitung, Speisefett- und Speiseölraffination
- Anhang 5: Obst- und Gemüseproduktion
- Anhang 6: Erfrischungsgetränke und Getränkeabfüllung
- Anhang 7: Fischverarbeitung
- Anhang 8: Kartoffelverarbeitung
- Anhang 10: Fleischwirtschaft
- Anhang 11: Brauereien
- Anhang 12: Herstellung von Alkohol und alkoholischen Getränken
- Anhang 14: Trocknung pflanzlicher Produkte für die Futtermittelherstellung
- Anhang 15: Herstellung von Hautleim, Gelatine, und Knochenleim
- Anhang 18: Zuckerherstellung
- Anhang 20: Fleischmehlindustrie
- Anhang 21: Mälzereien

In der durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalens (LANUV-NRW) gepflegten Direkteinleiter-Datenbank NIKLAS-IGL (2010), in der sich erfasste Betriebe den jeweiligen Anhängen der Abwasserverordnung zuordnen lassen, finden sich ebenfalls insgesamt 27 Direkteinleiter innerhalb der vorab aufgelisteten, dem Ernährungsgewerbe zugehörigen Anhänge. Eine Zusammenfassung der hier durchgeführten Auswertung gibt nachstehende Tabelle 2.

Die innerhalb der Indirekteinleiter-Datenbank INKA vorhandenen Datensätze von Industriebetrieben in Nordrhein-Westfalen müssen allerdings für eine branchenspezifische Analyse als noch nicht ausreichend bewertet werden.

Auch ohne umfassende, in den offiziellen Landesstatistiken erfasste Betriebsdaten kristallisieren sich aufgrund ihrer typischen Abwasserzusammensetzung viele Bereiche der Lebensmittelindustrie als besonders interessant hinsichtlich möglicher Energieeinsparpotenziale heraus. Überwiegend organisch hoch belastetes Produktionsabwasser fällt insbesondere in Betrieben der Milchverarbeitung, der Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie, der Stärkeindustrie, des Brauwesens, der Zuckerindustrie, der Hefeindustrie, der

Schlacht- und Fleischverarbeitung sowie bei Betrieben der Tierkörperverwertung an.

Tabelle 2: In der Direkteinleiterdatenbank NIKLAS-IGL erfasste Betriebe, entsprechend den Anhängen der Abwasserverordnung nach Branchen sortiert (NIKLAS-IGL, 2010)

Anhang der AbwV.	Branche	Anzahl Betriebe	Kennnummer (NIKLAS-IGL)
Anhang 3	Milchverarbeitung	1	252
Anhang 4	Ölsaatenaufbereitung, Speisefett- und Speiseölraffination	2	703, 732
Anhang 5	Herstellung von Obst- und Gemüseprodukten	3	002, 306, 748
Anhang 8	Kartoffelverarbeitung	1	702
Anhang 10	Fleischwirtschaft	4	653, 661, 811, 1079
Anhang 11	Brauereien	3	813, 301, 297
Anhang 15	Herstellung von Hautleim, Gelatine und Knochenleim	1	945
Anhang 18	Zuckerherstellung	4	340, 712, 345, 926
Anhang 20	Fleischmehlindustrie	3	657, 654, 779
Anhang 21	Mälzereien	1	662
Anhang 99	Sonstige (Kaffee/Milch)	1	965
	Sonstige Süßwaren	1	242
	Sonstige Süßwaren	1	427
	Sonstige Hefe	1	189

Nachfolgend werden einzelne Industriebranchen des Nordrhein-Westfälischen Ernährungsgewerbes detailliert betrachtet und hinsichtlich des vorhandenen Energieeinsparpotenzials bewertet.

4.2.1 Milchverarbeitung

4.2.1.1 **Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Milchverarbeitenden Industrie**

In der milchverarbeitenden Industrie fällt Abwasser an den unterschiedlichsten Stellen innerhalb der Betriebe an. Eine grundlegende Zusammenstellung wesentlicher Produktionsverfahren gibt beispielsweise die DWA-Arbeitsgruppe 2.5 „Molkereien“ in ihrem neu überarbeiteten Merkblatt DWA-M 708 (20xx). Als wesentliche Stellen des Abwasseranfalls in milchverarbeitenden Betrieben lassen sich die Vorbehandlung, die eigentliche Produktion, die Reinigung von Leitungen, Behältern, Anlagenoberflächen und Betriebsgebäude-teilen sowie die innerbetriebliche Wasseraufbereitung nennen. Menge und Belastungsgrad des anfallenden Abwassers hängen dabei ganz entscheidend ab von Produktart und Produktionsmenge, von der verfahrenstechnischen Ausrüstung innerhalb der Produktion und von innerbetrieblichen Arbeitsvorgaben. Nach Doedens (2000) ist die Abwasserbelastung bei milchverarbeitenden Betrieben zu einem überwiegenden Anteil mit Belastungen aus dem Verlust von Milch- bzw. Produktresten gleichzusetzen. Aus der Zusammensetzung der verarbeiteten Rohstoffe, wie beispielsweise dem Molke-, Fett- und Magermilchanteil lassen sich oftmals gute Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des anfallenden Produktionsabwassers ziehen.

Für eine detailliertere Beschreibung des Abwasseranfalls sowie der darin enthaltenen Schmutzfrachten und -konzentrationen anhand von spezifischen Kennzahlen (vgl. Tabelle 3) lassen sich u.a. durch den Verband der deutschen Milchwirtschaft veröffentlichte Untersuchungsergebnisse nutzen. Diese Ergebnisse basieren auf einer vom Verband durchgeführten Befragung von über 100 deutschen Molkereien (VDM, 2003). Geringere Abwasserbelastungen ergeben sich aus der Herstellung von Butter und Magermilchpulver sowie der Herstellung von Käse mit Molkepulver, wohingegen die Herstellung von Frischprodukten mit höheren Belastungen einhergeht.

Grundsätzlich gilt Abwasser aus der milchverarbeitenden Industrie als biologisch leicht abbaubar. Neben der hohen organischen Belastung (BSB₅-Konzentration: 600-2.000 mg/l; BSB₅-Fracht: 0,6-3,0 kg BSB₅/t Milchverarbeitung) weist es allerdings einige produktionspezifische Besonderheiten auf, die für eine zielführende Abwasserreinigung ebenfalls maßgebend sind. Aufgrund der an die Produktionsprozesse gekoppelten Reinigungszyklen weist das anfallende Abwasser erhebliche Schwankungen insbesondere hinsichtlich des pH-Wertes auf, weshalb eine Neutralisation vorzugsweise in einem Misch- und Ausgleichsbecken notwendig ist. Molkereiabwasser enthält kaum absetzbare Feststoffe, sodass Sedimentationsverfahren zur physikalischen

Vorbehandlung nahezu wirkungslos bleiben. Wegen des Einsatzes P-haltiger Reinigungsmittel ist Phosphor in der Regel im Überschuss vorhanden. Auch bei vermehrter biologischer P-Elimination ist eine zusätzliche P-Fällung zu empfehlen. Eine biologische Abwasserbehandlung ist in der milchverarbeitenden Industrie aufgrund des vorherrschenden BSB₅/N-Verhältnisses weitgehend ohne Zugabe von Stickstoff möglich. Allerdings ist mit teilweise erheblichen Nitratkonzentrationen im Rohabwasser aus dem Salpetersäureeinsatz in der Reinigung zu rechnen. Hohe Fettanteile bzw. verhältnismäßig große Konzentrationen von lipophilen Stoffen können bei der Abwasserreinigung problematisch sein und sind besonders zu berücksichtigen (Doedens, 2000).

Tabelle 3: Spezifische Kennzahlen für Molkereiabwasser (VDM, 2003)

Richtwerte für Molkereiabwasser	Einheit	Schwankungsbreite	
		tagesbezogen	stundenbezogen
Abwasseranfall	m ³ /1.000 kg Milch	1 - 2	0,5 - 4,0
BSB ₅ -Fracht	kg/1.000 kg Milch	0,6 - 3,0	
C _{BSB5}	mg/l	600 - 2.000	1 - 5.000
CSB-Fracht	kg/1.000 kg Milch	0,8 - 4,0	
C _{CSB}	mg/l	800 - 4.500	500 - 10.000
CSB/BSB ₅ -Verhältnis		1,3 - 2,2	1,1 - 2,8
CSB/TOC-Verhältnis		3-5	
S _{NO3-N}	mg/l	10 - 100	bis 250
S _{NO2-N}	mg/l	0 - 2	bis 10
S _{NH4-N}	mg/l	0 - 20	bis 50
C _{KN}	mg/l	10 - 110	bis 200
C _N	mg/l	20 - 230	bis 450
C _P	mg/l	20 - 100	bis 200
absetzbare Stoffe	ml/l	1 - 2	0 - 50
abfiltrierbare Stoffe	mg/l	200-800	bis 1000
abfiltrierbare Stoffe/BSB ₅		0,4-0,5	
pH-Wert		6 - 11	1 - 13
lipophile Stoffe	mg/l	80 - 250	bis 800

Gängige Verfahrenskonzepte zur Abwasserreinigung in Molkereien beinhalten eine Misch- und Ausgleichsstufe zur Neutralisation, eine chemisch-physikalische Vorbehandlung mittels Flotation zur Fettabscheidung, eine aerobe biologische Behandlung (inkl. Nitri- und Denitrifikation sowie Bio-P) und eine nachgeschaltete P-Fällung. Der wesentliche Anteil des für die Abwasserreinigung erforderlichen Energiebedarfs entfällt hier auf die notwendige Belüftungsenergie.

Obwohl die hohe organische Belastung in Molkereiabwasser grundsätzlich für den Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung spricht, ist eine Umsetzung in der Praxis problematisch. Insbesondere die Bildung und der Erhalt granulierter Biomasse gestalten sich in den Reaktoren aufgrund der hohen Fettkonzentrationen als schwierig. Hohe Kalzium- und Phosphorkonzentrationen wirken sich ebenfalls negativ aus.

4.2.1.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der milchverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen

Deutschlandweit besteht in der milchverarbeitenden Industrie über die letzten Jahrzehnte hinweg ein genereller Trend hin zu leistungsfähigen Großbetrieben. Dies lässt sich auch für Nordrhein-Westfalen feststellen. Laut einer von der Landesvereinigung der Milchwirtschaft Nordrhein-Westfalen e.V. (2009) vorgelegten Statistik zur Struktur der Milchwirtschaft in Nordrhein-Westfalen sind für das Jahr 2009 noch 8 Molkereiunternehmen mit eigener Milcherfassung und -verwertung, die zum Teil über mehrere Produktionsbetriebe verfügen erfasst. An diese 8 Molkereiunternehmen wurden 2009 etwa 1,844 Mio. t Rohmilch angeliefert, was etwa 73 % der insgesamt an milchverarbeitende Betriebe gelieferten Milch entspricht. Hierunter stechen 4 Großunternehmen (Anlieferungsmenge > 0,1 Mio. t Rohmilch) hervor, die ca. 90 % der 1,844 Mio. t Rohmilch abnehmen. Neben den Molkereien mit eigener Milcherfassung und -verarbeitung sind weitere 3 Unternehmen verzeichnet, die ausschließlich Milch sammeln (ca. 0,698 Mio. t Rohmilch). Inklusive Molkereien sind 8 zusätzliche Unternehmen, die Milchprodukte verschiedener Art herstellen aufgeführt.

Insgesamt wurden 2009 etwa 2,541 Mio. t Rohmilch an die milchverarbeitenden Betriebe in Nordrhein-Westfalen geliefert. Aus der überwiegenden Menge dieser Rohmilch wurden die in der nachstehenden Tabelle 4 aufgelisteten Produkte gefertigt:

Weder auf Basis öffentlich zugänglicher Statistiken (wie z.B. IT.NRW, 2007) noch anhand der vorab beschriebenen Direkt- bzw. Indirekteinleiter-Datenbanken lässt sich die Abwassersituation innerhalb der milchverarbeitenden Industrie für Nordrhein-Westfalen ausreichend abbilden. Aus den jährlichen Erhebungen des Verbands der Deutschen Milchwirtschaft lässt sich allerdings für die Jahre 2004-2007 ein Abwasser/Milch-Verhältnis von 1,48-1,55 ermitteln (VDM, 2003). Somit kann, eine verarbeitete Rohmilchmenge von 2,541 Mio. t/a vorausgesetzt, mithilfe eines angenommenen Abwasseranfalls von 1,5 m³/t verarbeitete Rohmilch die branchenspezifische Gesamtabwassermenge für das Jahr 2009 zu etwa 3,8 Mio. m³/a abgeschätzt werden. Die bei der Verarbeitung von 2,541 Mio. t Rohmilch in Nordrhein-Westfalen jährlichen anfallende CSB-Schmutzfracht entspricht in etwa 7.623 t CSB/a ($C_{CSB} = 3 \text{ kg CSB/t verarb. Milch}$).

Tabelle 4: In Nordrhein-Westfalen produzierte Milcherzeugnisse für das Jahr 2009

In 2009 hergestellte Milchprodukte	in Mio. kg/a
Konsummilch (insgesamt)	ca. 959
Milchmischgetränke	ca. 154
sonst. Milchmischerzeugnisse (einschl. Puddings, Crèmes usw.)	ca. 158
Joghurt (einschl. Joghurt/Kefir/Sauermilch mit Frucht)	ca. 196
Sahneerzeugnisse (einschl. Kaffee- u. Schlagsahne, Saure Sahne)	ca. 114
Käse (insgesamt)	ca. 51
Butter	ca. 25

Der branchenspezifische Belüftungsenergiebedarf für die aerobe, vollbiologische Reinigung dieser CSB-Schmutzfracht wird unter Berücksichtigung spezifischer Kennzahlen auf etwa 4.930.000 kWh/a abgeschätzt (vgl. Tabelle 5). Wenn davon ausgegangen wird, dass der Belüftungsenergiebedarf ca. 80 % des Energiebedarfs der Belebungsstufe und dieser wiederum etwa 73 % des Gesamtenergiebedarfs einer solchen Kläranlage ausmacht, dann kann der Gesamtenergiebedarf der Anlage auf ungefähr 8.440.000 kWh/a abgeschätzt werden. Derzeit ist in Nordrhein-Westfalen der Einsatz von keiner anaeroben Reinigungsanlage zur Vorbehandlung von Abwasser aus der milchverarbeitenden Industrie bekannt.

4.2.1.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der milchverarbeitenden Industrie in Nordrhein-Westfalen

Wie bereits geschildert ist auf Basis vorhandener Daten keine sicher Zuordnung von Produktionsmengen und Produktpaletten zu Betriebsstätten für die milchverarbeitende Industrie in Nordrhein-Westfalen möglich. Hierdurch wird eine Abschätzung des Energieeinsparpotenzials deutlich erschwert.

Die für den Einsatz anaerober Reinigungsverfahren relevante Abwasserzusammensetzung (CSB, Temperaturen etc.) ist auch bei Molkereien stark vom Produktionsspektrum (d.h. den hergestellten Produkten) einzelner Betriebe abhängig. Der Einsatz der Anaerobtechnik für die Vorbehandlung von Produktionsabwasser, das vornehmlich bei der Trinkmilchherstellung anfällt, erscheint für eine großtechnische Umsetzung als nicht wirtschaftlich. Unter Nichtberücksichtigung standortspezifischer Randbedingungen (wie z.B. die Höhe der Abwassergebühren, Energiekosten etc.) kann aus verfahrenstechnischen Gesichtspunkten ein Schwellenwert von mindestens 2 t CSB/d für den wirtschaftlichen Bau und Betrieb einer Anaerobanlage festgesetzt werden. Eine solche Mindest-CSB-Fracht entspricht einer Milchverarbeitung von ca. 0,224 Mio. t/a. Der Einsatz von Anaerobtechnik erscheint überhaupt nur in Betrieben wirtschaftlich umsetzbar, die als wesentlichen Produktanteil Frischprodukte wie z. B. Joghurts, Pudding, Kaffeeprodukte, Sahne, Käse und Butter etc. aufweisen. Hier werden infolge von notwendigen Reinigungsprozessen entsprechend hohe Abwasserfrachten erwartet.

Tabelle 5: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die milchverarbeitende Industrie Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung:	mechanisch / Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 35 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 40 \%$)	mechanisch / Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 35 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 40 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli}	2 kWh/kg BSB _{eli}
<i>Belüftungsenergiebedarf für Gesamtjahresschmutzfracht (Bezug: 7.623 t CSB/a)</i>	4.930.000 kWh/a	
Belüftungsenergiebedarf für Schmutzfracht mit Potenzial für Anaerobtechnik (Bezug: 4.750 t CSB/a)	3.072.000 kWh/a	614.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		2.457.000 kWh/a

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
Methanproduktion		741.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35\%$)		2.594.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe:		5.051.000 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾ (Bezug: 4.750 t CSB/a)	5.260.000 kWh/a	(2.802.000 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung: (Ansatz: 0,575 kg CO _{2e} /kWh)		2.904.000 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

Für Nordrhein-Westfalen ergibt sich ausgehend von den Produktionsdaten der Tabelle 4 für das Jahr 2009 als Summe der neben Konsummilch hergestellten Produkte eine jährliche Menge von ca. 0,7 Mio. t Produkt. Die für diese Produkte eingesetzte Rohmilchmenge kann als rechnerische Differenz zu ca. 1,582 Mio. t Rohmilch abgeschätzt werden (spezifischer Einsatz von 2,26 kg Rohmilch/kg sonst. Produkt). Bei Ansatz einer spezifischen CSB-Konzentration von 3 kg CSB/t verarb. Milch beträgt die im Molkereiabwasser vorhanden und für den Einsatz anaerober Reinigungsverfahren interessante CSB-Jahresfracht aus den o.g. Produkten in etwa 4,75 Mio. kg CSB/a. Wie die in Kapitel 4.2.1.2 vorgestellten Branchenzahlen zeigen, wurde in Nordrhein-Westfalen allerdings eine Anliefermenge von jährlich mehr als 0,1 Mio. t Rohmilch nur von den 4 Großunternehmen verarbeitet. Diese Unternehmen verbuchen allerdings ca. 90 % (ca. 1,67 Mio. t/a) der direkt an Molkereien gelieferten Rohmilchmenge auf sich. Für die nachfolgende Bilanzierung wird hier davon ausgegangen, dass die für eine anaerobe Behandlung interessante CSB-Jahresfracht von 4,75 Mio. kg CSB/a ausschließlich in Betrieben anfällt, bei denen auch der aus verfahrenstechnischer Sicht entscheidende Grenzwert von mindestens 2 t CSB/d überschritten wird.

Die Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials erfolgt über einen Verfahrensvergleich zwischen einer rein aeroben biologischen Abwasserreinigung und einer Kombination mit anaerober Vorbehandlung. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse dieser Betrachtung zusammengefasst. Die mit der anaeroben Vorbehandlung erzielten Einsparungen beziehen sich ausschließlich auf die reduzierte CSB-Jahresfracht von etwa 4,75 Mio. kg CSB/a. Ohne genauere Betriebskenntnisse wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass

diese CSB-Jahresfracht in solchen Betrieben anfällt, bei denen eine tägliche CSB-Mindestfracht von 2 t CSB/d überschritten wird.

Die für einen ausreichenden Sauerstoffeintrag benötigte elektrische Belüftungsenergie lässt sich durch die anaerobe Vorbehandlung um etwa 2,46 Mio. kWh/a reduzieren. Gleichzeitig wird bei dem anaeroben Abbau der organischen Schmutzfracht mit ca. 0,74 Mio. m³ CH₄/a eine erhebliche Menge Biogas produziert, die sich mittels BHKW-Anlage zu etwa 2,59 Mio. kWh/a elektrischer Energie verstromen lässt. Die bei der Gasverwertung anfallende Abwärme wird in der Bilanzieren vernachlässigt, das sie zu großen Teilen verfahrenintern für die Temperierung der Anaerobreaktoren verwendet wird.

4.2.2 Erfrischungsgetränke-, Fruchtsaftindustrie und Mineralbrunnen

4.2.2.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Fruchtsaftindustrie

Auch in der Erfrischungsgetränke-, Fruchtsaftindustrie und den Mineralbrunnen hängen Abwasseranfall und -beschaffenheit entscheidend von saisonalen Schwankungen sowie von dem Produktionsspektrum der jeweiligen Betriebe ab. Aufgrund der Vielfältigkeit der Produkte gelten für die Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie Begriffsbestimmungen der „Verordnung über Fruchtsaft, einige ähnliche Erzeugnisse und Fruchtnektar“ (Fruchtsaftverordnung FrSaftV 2004). Zudem sind die Leitsätze für die Erfrischungsindustrie (Neufassung 27.11.2002, i.d.F. Februar 2003) und für Gemüsesaft und Gemüsenektar (Oktober 1981, i.d.F. Dezember 1991) zu berücksichtigen. Für die Mineralbrunnen gilt die „Verordnung über natürliches Mineralwasser, Quellwasser und Tafelwasser“ (Verordnung vom 1.8.1984 in der Fassung vom 01.12.2006).

Im Zuge dieses Berichtes liegt der Schwerpunkt auf den Betrieben der Fruchtsaftindustrie. In der Fruchtsaftindustrie sind drei wesentliche Betriebsformen zu unterscheiden: Bei der ersten handelt es sich um sogenannte Halbwerebetriebe (Betriebsform 1), die Frucht- und Gemüsesorten verarbeiten, die zweite umfasst Unternehmen, die Halbwere ausschließlich aufbereiten und abfüllen (Betriebsform 2) und als dritte Form sind Betriebe zu nennen, die beides verknüpfen (Betriebsform 3). Aufgrund dieser Bandbreite, die wesentliche Auswirkungen auf die Abwasserzusammensetzung hat, gibt es eine Vielzahl von abwasserspezifischen Kennzahlen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige Betriebe durch erhebliche Schwankungen während der Kampagne gekennzeichnet sind.

Einige wesentliche Kennzahlen sowie grundlegende Informationen zu den Produktionsprozessen finden sich z.B. im Merkblatt M-766 DWA-Arbeitsgruppe IG 2.13 „Abwasser der Erfrischungsgetränke-, der Fruchtsaft-Industrie und der Mineralbrunnen“ (Stand Januar 1999) bei Austermann-Haun und Rosenwinkel (2000) bzw. bei Bischofsberger et. al. (2005). Dieses Arbeitsblatt wird derzeit überarbeitet. Vorwiegend enthält Abwasser der Fruchtsaftindustrie Belastungen aus den Betriebsbereichen Wasseraufbereitung, Schwemm- und Waschwasser, Brüdenkondensat, Abwasser aus Flaschen- und Behälterreinigung sowie der Abfüllung. Dazu kommt Abwasser aus der Reinigung der Produktionshallen und von den Verkehrsflächen. Abwassermenge und Belastungsgrad sind sowohl abhängig von der Betriebsform, der Produktart und der Produktionsmenge als auch der verfahrenstechnischen Ausrüstung und den angewendeten produktionsintegrierten Maßnahmen des einzelnen Betriebes. Anfallendes Abwasser ist in der Regel hoch mit organischen Stoffen (Produktverlusten), Reinigungs- und Desinfektionsmitteln (z.B. Chloride) sowie gegebenenfalls Erdresten und suspendierten Stoffen (z.B. Pflanzenfasern) belastet. Da den größten Anteil die Produktverluste haben, sind in nachstehender Tabelle 6 die wesentlichen Abwasserparameter einiger Frucht- und Gemüsesäfte angegeben.

Tabelle 6: Wesentliche Abwasserparameter für die Produktion von Frucht- und Gemüsesäften (Austermann-Haun und Rosenwinkel, 2000)

Saft	pH von - bis	BSB ₅ von - bis g/l	CSB von - bis g/l	TOC von - bis g/l	N _{ges} von - bis g/l	P _{ges} von - bis g/l	BSB:N:P von - bis g/l
Apfelsaft	3,2 - 3,4	42 - 62	85 - 130	32 - 46	200 - 240	40 - 85	100:0,42:0,12
Orangensaft	3,6 - 3,8	61 - 85	83 - 135	38 - 55	1.075	115 - 210	100:1,47:0,22
Grapefruitsaft	3,3	70	117	48	850	100 - 200	100:1,21:0,21
Ananassaft	3,5	29	144	-	640	100	100:2,21:0,34
Zitronensaft	2,9	38	89	29	640	80 - 150	100:1,68:0,30
Bananenmark	4,9	110	186	54	1.840	200 - 310	100:1,67:0,23
Birnensaft	3,2 - 3,6	88 - 110	172 - 175	63 - 69	140 - 210	65 - 200	100:0,18:0,13
Aprikosenmark/-saft	3,5	105	194	78	800 - 1.600	100 - 300	100:1,14:0,19
Pfirsichmark/-saft	3,6	100	174	71	1.280 - 1.600	168	100:1,44:0,17
Traubensaft	2,9 - 3,2	78 - 99	116	45 - 52	360	80 - 180	100:0,41:0,15
Johannisbeersaft	3,0 - 3,2	79 - 114	111 - 186	44 - 62	500 - 660	210	100:0,60:0,22
Sauerkirschsaft	3,2	110	162	65	660	180	100:0,60:0,16
Rote-Beete-Saft	5,5 - 6,3	46 - 50	93	34	1.790 - 2.010	210 - 480	100:3,96:0,72
Tomatensaft	4,1	25 - 33	45 - 58	-	1.290	120 - 200	100:4,45:0,55
Möhrensaft	4,3 - 4,4	22 - 30	54 - 72	-	1.080	240 - 350	100:3,88:1,13

Eine detaillierte Beschreibung des Abwasseranfalls mit den darin enthaltenen Schmutzkonzentrationen und -frachten ist aufgrund der Vielzahl der zu bearbeitenden Produkte sowie der Einflüsse durch die verschiedenen Gebindearten und -größen nicht möglich. In nachstehender Tabelle 7 sind Werte angegeben, die auf der Auswertung der Abwasserdaten einer repräsentativen Zahl von Betrieben im Rahmen einer Umfrage der Verbandes der Fruchtsaftindustrie (VdF) beruhen (DWA-M-766,1999). Während der Kampagne können in den verarbeitenden Betrieben höhere Belastungen auftreten.

Tabelle 7: Spezifische Abwasserkennwerte für die Fruchtsaftproduktion

Richtwerte für Fruchtsaftabwasser	Einheit	Betriebsform		
		1	2	3
Spez. Abwasseranfall	m ³ /t* bzw. m ³ /1.000 l**	1,5 – 2,0	0,55 – 3,8	1 - 4
<u>Konzentrationen</u>				
absetzbare Stoffe	mg/l	10 - 150	0,5 - 25	2 - 30
BSB ₅	mg/l	1.700 - 4.000	250 - 1.000	400 - 2.000
CSB		2.500 - 4.500	1.500 - 3.000	400 - 3.000
N _{ges}	mg/l	5 - 30	1,2 - 10	9 - 25
P _{ges}	mg/l	3 - 15	1,5 - 12	2 - 14
pH-Wert	-	3,6 - 11	4 – 11,5	3,5 - 11

*Obst und Gemüse nur Betriebsform 1; ** Fertigware

Grundsätzlich gilt das Abwasser aus der Fruchtsaftindustrie als biologisch gut abbaubar.

Der Anteil an absetzbaren Stoffen wird vom jeweiligen Stand der produktionsintegrierten Maßnahmen und der Verarbeitung der unterschiedlichen Rohwaren beeinflusst. Der pH-Wert liegt, verursacht durch die organischen Säuren des Obstes, in der Regel im sauren pH-Bereich; die hohen pH-Werte treten nur während der Reinigung auf. Durch die enthaltenen organischen Säuren ist ein biologischer Abbau der Säuren sinnvoll; eine chemische Neutralisation kann jedoch aus Gründen des Korrosionsschutzes erforderlich sein. Abwasser der Fruchtsaftindustrie zeichnet sich weiterhin durch einen Mangel an Stickstoff und Phosphor aus. Verfahren wie Sedimentationsbecken eignen sich zum Rückhalt der absetzbaren Stoffe nicht, da es aufgrund der guten Abbauarbeit leicht zu Gärprozessen und daraus resultierend Geruchsproblemen kommt. Es haben sich jedoch als Vorbehandlung belüftete Misch- und Ausgleichsbecken bewährt, um die Schwankungen in Abwassermengen, Konzentrationen und Frachten auszugleichen. Aufgrund der guten Abbaubarkeit werden Wirkungsgrade zwischen 35 % (Tagesausgleich) und 50 % (Teilwochenausgleich) bezogen auf den BSB₅ erreicht. Neben den Misch- und

Ausgleichsbecken haben sich zur Vorbehandlung des Abwassers auch Kunststoffropfkörper und anaerobe Verfahren bewährt. Der Betrieb von Misch- und Ausgleichbecken vor einer Anaerobanlage sollte ohne Belüftung, jedoch mit Umwälzung erfolgen, da er so als Vorversäuerung dient. Eine aerobe biologische Abwasserbehandlung ist aufgrund des Nährsalzangebotes nicht ohne Zugabe von Stickstoff möglich, da das erforderliche Nährstoffverhältnis bei 100:5:1 liegt. Da bei einer anaeroben Abwasserbehandlung ein Nährstoffverhältnis von CSB:N:P von 800:5:1 benötigt wird, sind diese Verfahren ohne Nährsalzzugabe möglich.

Gängige Verfahrenskonzepte zur Abwasserreinigung in der Fruchtsaftindustrie sind anaerobe Verfahren, ausgeführt als Schlammbettreaktoren, sowohl nach dem UASB-Verfahren als auch dem heute überwiegend eingesetzten Hochlastverfahren als EGSB. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber pH-Wert-Stößen sind diesen Verfahren Misch- und Ausgleichbecken mit geeigneten Neutralisationseinrichtungen vorzuschalten. Die Anaerobstufe sollte zweistufig, d.h. mit Trennung der Vorversäuerung und der Mechanisierung, ausgeführt werden.

4.2.2.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Fruchtsaftherstellenden Industrie in Nordrhein-Westfalen

Öffentlich zugängliche Statistiken (wie z.B. IT.NRW, 2007) bzw. die vorab beschriebenen Direkt- oder Indirekteinleiter-Datenbanken liefern keine ausreichenden Informationen, um die Struktur der fruchtsaftherstellenden Industrie in Nordrhein-Westfalen ausreichend abzubilden. Aus dem statistischen Jahrbuch geht allerdings hervor, dass der Branchenanteil der Nordrhein-Westfälischen Betriebe im Jahr 2009 etwa 25 % der bundesdeutschen Produktion ausmacht. Dies entspricht einem Produktionswert von ca. 500 Mio. Euro. Nach Informationen des Verbandes der deutschen Fruchtsaftindustrie (VdF, 2010) sind im Verbandsgebiet Nordrhein-Westfalen 26 Mitgliedsfirmen verzeichnet. Betriebsspezifische Produktionszahlen bzw. eine Gesamtproduktionsmenge liegen für Nordrhein-Westfalen nicht vor. Wesentliche Anteile der in Nordrhein-Westfalen hergestellten Produktmenge lassen sich allerdings über eine Aufstellung der 30 größten Getränkehersteller für das Jahr 2009 ermitteln (BRAUWELT, Nr. 41, 2010). Hier sind für das Land Nordrhein-Westfalen 8 Großbetriebe aus der Fruchtsaftherstellenden Industrie (inkl. Mineralwässer und Erfrischungsgetränke) aufgelistet, die zusammen in der Jahresproduktion etwa 40 Mio. hl Getränk hergestellt haben (vgl. Tabelle 8). Von diesen 8 Unternehmen werden bereits an drei Standorten anaerobe Vorbehandlungsanlagen zur Abwasserreinigung betrieben. Auf dieser Datengrund-

lage basiert die nachfolgende Ermittlung möglicher Energieeinsparpotenziale bei der Reinigung des anfallenden Produktionsabwassers.

Tabelle 8: In Nordrhein-Westfalen ansässige Großbetriebe aus der Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie (inkl. Mineralbrunnen) mit Produktionszahlen für das Jahr 2009

	Jahresproduktion ¹⁾ [Mio. hl Getränk/a]	abgeschätzte CSB-Schmutzfracht [t CSB/a]	Bewertung
Betrieb A	6,81		überwiegend Mineralwässer (geringe CSB-Konzentration)
Betrieb B	7,37	2.653	Potenzial vorhanden
Betrieb C	6,50		Anaerobanlage vorhanden
Betrieb D	5,76	2.073	Potenzial vorhanden
Betrieb E	4,11		überwiegend Mineralwässer (geringe CSB-Konzentration)
Betrieb F	3,95		Anaerobanlage vorhanden
Betrieb G	3,29		Anaerobanlage vorhanden
Betrieb H	2,59	932	Potenzial vorhanden

¹⁾ Quelle: BRAUWELT, Nr. 41 (2010)

4.2.2.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Fruchtsaftherstellenden Industrie Nordrhein-Westfalens

Auch für die Fruchtsaftherstellende Industrie (inklusive Herstellung von Mineralwässern und alkoholfreier Getränke) erfolgt die Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials über einen Vergleich zwischen rein aerober biologischer Abwasserreinigung und einer entsprechenden Kombination mit anaerober Vorbehandlung. Zwei der in Tabelle 8 aufgelisteten 8 Getränkehersteller (Betriebe A u. E) werden dabei nicht berücksichtigt, da aufgrund der jeweiligen Produktionspalette (überwiegend Mineralwässer; nur geringer Anteil Fruchtsaftherstellung bzw. -abfüllung) von geringen organischen Schmutzfrachten im anfallenden Produktionsabwasser ausgegangen wird. In drei weiteren Betrieben (C, F u. G) werden bereits Anaerobanlagen betrieben. Bei den drei verbleibenden Betrieben B, D und H wird ein ausreichendes Potenzial für eine anaerobe Vorbehandlung gesehen. Aufgrund von detaillierten Kenntnissen der Abwasserreinigungsanlagen von den Betrieben F u. G wird zusätzlich davon ausgegangen, dass sich mit der Produktionskapazität von Betrieb H auch gut die untere Grenze für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit einer anaeroben Vorbehandlungsanlage abbilden lässt. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, wird die verbleibende CSB-Jahresschmutzfracht, die für den Vergleich zwischen aerober und anaerober + aerober Reinigung herangezogen wird, auf etwa 5.660 t CSB/a abgeschätzt. Berechnungs-

ergebnisse für diesen Verfahrensvergleich sind in nachstehender Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die Fruchtsaftindustrie Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung:	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$)	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf		
<i>Betrieb B</i>	2.734.000 kWh/a	547.000 kWh/a
<i>Betrieb D</i>	2.137.000 kWh/a	427.000 kWh/a
<i>Betrieb H</i>	961.000 kWh/a	192.000 kWh/a
Belüftungsenergiebedarf in Summe:	5.832.000 kWh/a	1.167.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		4.665.000 kWh/a
Methanproduktion		
<i>Betrieb B</i>		573.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb D</i>		448.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb H</i>		201.000 m ³ CH ₄ /a
Methanproduktion in Summe:		1.222.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		4.277.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe:		8.942.000 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾	9.986.000 kWh/a	(5.320.000 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung: (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		5.142.000 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

Die für einen rein aeroben Abbau dieser 5.660 t CSB-Jahresschmutzfracht benötigte elektrische Belüftungsenergie ergibt sich unter Berücksichtigung einer mechanischen Vorklärung ($\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$) zu etwa 5,83 Mio. kWh/a. Durch eine anaerobe Vorbehandlung lässt sich dieser Bedarf um ca. 4,67 Mio. kWh/a und somit um ungefähr 80 % reduzieren. Zusätzlich wird durch den anaeroben Abbau der organischen Schmutzfracht eine Methangasmenge von etwa 1,22 Mio. m³ CH₄/a gewonnen, die sich mittels BHKW-Anlage zu etwa 4,28 kWh/a elektrischer Energie verstromen lässt. Die bei der energetischen Verwertung des Biogases anfallende Abwärme wird

wiedermum nicht in der Bilanzierung berücksichtigt, da sie weitgehend innerhalb des anaeroben Reinigungsprozesses für die Temperierung der Reaktoren benötigt wird.

4.2.3 Stärkeindustrie

4.2.3.1 **Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Stärkeindustrie**

In dem Merkblatt ATV-DVWK-M 776 (2002) gibt die DWA-Arbeitsgruppe 2.4 „Stärke-Industrie“ einen umfangreichen Überblick über die Produktionsprozesse, die Abwassersituation und aktuell verbreitete Reinigungsstrategien in der Stärkeindustrie. Generell werden der spezifische Abwasseranfall und die Beschaffenheit des Abwassers maßgeblich von den verwendeten Rohstoffen beeinflusst. Eine ausgeprägte Wasserkreislaufführung zur Minimierung der eingesetzten Frischwassermenge ist heutzutage innerhalb der Stärkeindustrie Stand der Technik und weit verbreitet. Grundlegende Informationen zu Abwasseranfall und -beschaffenheit finden sich ebenfalls bei Austermann-Haun und Seyfried (2000) sowie Bischofberger et al. (2005). In Kurzform wird hier auf die Herstellungsprozesse von Mais- und Weizenstärke eingegangen, da beide Rohstoffe in Nordrhein-Westfalen verarbeitet werden.

Bei der Maisstärkeherstellung werden etwa 1,4 - 1,7 m³ Frischwasser pro t Reinmais im letzten Verfahrensschritt der Stärke-/Glutenseparation eingesetzt. Das Wasser wird anschließend zurückgeführt und in den vorgeschalteten Produktionsschritten weitergenutzt. Brüdenkondensat aus der Quellwassereindampfung (ca. 0,4-0,7 m³ Abwasser pro t Reinmais) stellt im Gesamtprozess die wesentliche Abwasseranfallstelle dar. Die restliche Wassermenge wird aus dem Herstellungsprozess die Produkte selbst ausgeschleust.

Tabelle 10: Abwassercharakteristik für Brüdenkondensat aus der Maisstärkefabrikation (Austermann-Haun und Seyfried, 2000)

Parameter	Einheit	Brüdenkondensat Wertebereich
pH-Wert	-	2,3 bis 4,5
CSB _{homog.}	mg/l	1.500 bis 2.500
BSB _{5 homog.}	mg/l	1.000 bis 1.700
N _{ges.}	mg/l	4 bis 8

Spezifische Kennwerte für Menge und Qualität des Brüdenkondensates gibt Tabelle 10. Ein ausgeprägter Kampagnenbetrieb ist bei der Herstellung von Maisstärke nicht vorhanden. Es ist allerdings zu unterscheiden, ob Trockenmais (ca. 310 d/a) oder erntefrischer Mais (ca. 30 d/a), der einen höheren Wassergehalt besitzt (25-23 %), verarbeitet wird.

Bei der Gewinnung von Weizenstärke wird für die Stärke-/Glutentrennung der Rohstoff Weizenmehl ebenfalls in einem Nassprozess behandelt. Das eingesetzte Frischwasser wird wie bei der Maisstärkeproduktion intensiv mehrfachgenutzt. Prozesswässer werden im Wesentlichen bei den Konzentrations-schritten der Glutenseparation aus dem Herstellungsprozess als Abwasser ausgeschleust. Typische Kennwerte für das bei der Herstellung von Weizenstärke anfallende Abwasser sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Kennwerte für unbehandeltes Produktionsabwasser aus der Weizenstärkefabrikation (Abwasseranfall: etwa 2,5 m³/t Mehl) (ATV-DVWK M 776, 2002)

Parameter	Einheit	Brüdenkondensat Wertebereich
CSB	mg/l	25.000 bis 30.000
N _{ges.} (davon < 95 % organisch gebunden)	mg/l	1.000
P _{ges.}	mg/l	200

4.2.3.2 Branchenstruktur und Abwassersituation in der Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens

Nach Informationen des Fachverbandes der Stärke-Industrie (2009) haben im Jahr 2008 bundesweit 8 Firmen an 14 Standorten etwa 1,53 Mio. t Stärke produziert und dabei einen Umsatz von ca. 1,72 Mrd. € erwirtschaftet. Insgesamt wurden etwa 4,43 Mio. t Rohstoffe zur Stärkeproduktion verarbeitet. Von der insgesamt produzierten Stärke beträgt der aus Kartoffeln hergestellte Anteil 42 % (ca. 0,64 Mio. t/a), der aus Mais hergestellter Anteil 25 % (0,38 Mio. t/a) und der aus Weizen hergestellte Anteil 33 % (ca. 0,50 Mio. t/a).

In Nordrhein-Westfalen sind 4 der bundesweit tätigen Unternehmen ansässig. Etwa 30-35 % des Gesamtumsatzes der Stärkeindustrie wird in Nordrhein-Westfalen erwirtschaftet. Die 4 ansässigen Unternehmen produzieren dabei in 4 Werken. An einem Standort wird dabei Stärke aus Mais, an den übrigen drei Standorten wird Weizenstärke produziert. Weder aus den öffentlich zugänglichen Landesstatistiken (IT.NRW, 2007) noch aus der Direkt- bzw. Indirekteinleiter-Datenbank sind unternehmensspezifische Daten zu entneh-

men. Aufgrund der Konkurrenzsituation innerhalb der Branche und wegen der sehr geringen Anzahl an Unternehmen werden keine Produktionszahlen veröffentlicht, sodass die branchenspezifische Abwassersituation bzw. die Energieeinsparpotenziale nur grob abgeschätzt werden können. Es ist allerdings bekannt, dass in Nordrhein-Westfalen in 2010 insgesamt ca. 640.000 t Stärke produziert wurden und an einem der 4 Werke bereits eine Anaerobanlage zur Vorbehandlung des zu reinigenden Abwassers eingesetzt wird (Bischofsberger et. al., 2005).

4.2.3.3 **Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens**

Für eine Abschätzung des möglichen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens werden aufgrund von branchenspezifischen Randbedingungen (Konkurrenzsituation, Schutz der Betriebsdaten) ausschließlich Weizenmehl verarbeitende Betriebe berücksichtigt. Die bei der Produktion von Weizenstärke anfallende und nicht anaerob vorbehandelte CSB-Schmutzfracht wird hier auf 10.050 t CSB/a abgeschätzt. Bezogen auf diese CSB-Schmutzfracht wird hier das Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie) wiederum über die Vergleichsbetrachtung einer Abwasserreinigung mit anaerober Vorbehandlung gegenüber einem rein aeroben Verfahrenskonzept ermittelt.

Die für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr im Belebungsbecken notwendige Belüftungsenergie lässt sich bei einer rein aeroben biologischen Behandlung der o.g. Jahresschmutzfracht von 10.050 t CSB auf 9,05 Mio. kWh/a abschätzen. Die mechanische Vorbehandlung wurde hier mit Wirkungsgraden von $\eta_{\text{CSB}} = 30 \%$ bzw. $\eta_{\text{BSB}} = 35 \%$ berücksichtigt (Tabelle 12). Im Verfahrenvergleich lässt sich durch den kombinierten Betrieb einer Anaerobstufe mit nachgeschalteter Aerobstufe eine Belüftungsenergie von etwa 7,24 Mio. kWh/a einsparen. Durch die energetische Verwertung der produzierten Biogasmenge (ca. 1,69 Mio. m³ CH₄/a) lässt sich zusätzlich elektrische Energie von etwa 5,91 Mio. kWh/a gewinnen. Die weitgehend für die Temperierung der Reaktoren benötigte anfallende Wärmeenergie wird auch hier in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Die in Teilen der Stärkeindustrie (insbesondere in der Maisstärkeproduktion) verbreitete, energieintensive Stofftrennung mittels Eindampfungsverfahren und eine mögliche landbauliche Verwertung überschüssigen Prozesswassers sind in dieser Vergleichsbetrachtung nicht berücksichtigt. Aus energetischer Sicht lässt sich bei einem vollständigen Verzicht auf eine Eindampfung sicherlich eine erhebliche Energieeinsparung erzielen. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über die Rentabilität des Eindampfungsverfahrens in der Stärkeproduktion sind die Energiekosten und der bei der Verwertung des gewonnenen Konzentrats (vorzugsweise als Bestandteil in Tierfutter) bzw. bei dessen Vermarktung erzielte Preis als wesentliche Faktoren anzuführen.

Tabelle 12: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 30 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 35 \%$)	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 30 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 35 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf für Schmutzfracht mit Potenzial für Anaerobtechnik (Bezug: 10.050 t CSB/a)	9.053.000 kWh/a	1.811.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		7.242.000 kWh/a
Methanproduktion		1.688.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		5.909.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe		13.151.000 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾	15.501.000 kWh/a	(8.259.000 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		7.562.000 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

4.2.4 Brauereien

4.2.4.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Brauereien

Die Produktion von Bier erfolgt innerhalb einer Brauerei in verschiedenen Bereichen (i.W. Maschinen- und Kesselhaus, Sudhaus, Gär- und Lagerkeller, Filtration, Abfüllung), in denen sowohl Abwasser als auch unterschiedliche Reststoffe anfallen.

Eine grundlegende Zusammenstellung ist dem im September 2010 erschienenen Merkblatt DWA-M 732 (2010) „Abwasser aus Brauereien“ zu entnehmen. Brauereiabwasser zeichnet sich aufgrund saisonaler Bedingungen innerhalb einer Jahressganglinie durch unterschiedlich anfallende Abwassermengen und Konzentrationen aus. Zudem sind starke pH-Wert Schwankungen zwischen 3 u. 12 sowie Abwassertemperaturen im Bereich von 25-35 °C kennzeichnend. Die Höhe der absetzbaren Stoffe ist sehr unterschiedlich, da sie im Wesentlichen durch den realisierten betrieblicher Rückhalteeinrichtungen beeinflusst wird. Die Inhaltsstoffe des Abwassers sind in Abhängigkeit der hergestellten Produkte unterschiedliche Konzentrationen von im Wesentlichen Kohlenhydraten und Eiweißen.

Wesentliche Abwasseranfallstellen sind in allen Bereichen durch Reinigungen (Leitungen, Behälter), Produktverluste und Umgang mit Reststoffen gegeben. Die nachstehende Beschreibung des Abwasseranfalls (Tabelle 13) sowie die darin enthaltenen Schmutzkonzentrationen und -frachten sind aus dem Merkblatt DWA-M 732 entnommen. Die Angaben zum Abwasseranfall beziehen sich dabei auf Brauereien mit sorgfältiger Betriebsführung und Durchführung produktionsintegrierter Maßnahmen. Den Angaben der Konzentrationen liegen Tagesmischproben von Brauereien mit einem mittleren Abwasseranfall zugrunde.

Tabelle 13: Spezifische Kennwerte für Abwasser aus Brauereien

Richtwerte für Brauereiabwasser	Einheit	Werte	Tendenz
Spez. Abwasseranfall	m ³ /hl VB*	0,25 – 0,6	0,2
Spez. BSB ₅ -Fracht	kg/hl VB	0,3 – 0,6	0,25
BSB ₅ -Konzentration	mg/l	1.100 – 1.500 (2.200)	
CSB/BSB ₅ – Verhältnis	-	1,5 – 1,8	1,7 - 2
Spez. CSB-Fracht	kg/hl VB	0,54 – 1,08	0,42 -0,5
CSB-Konzentration	mg/l	1.800 – 3.000 (4.000)	
N _{ges}	mg/l	30 – 100	
P _{ges}	mg/l	10 - 30	
pH-Wert	-	3 - 12	

* hl VB = Hektoliter Verkaufsbier

Brauereiabwasser zeichnet sich durch gute biologische Abbaubarkeit aus. Grundsätzlich ist die Anwendung produktionsintegrierter Maßnahmen sowohl in Hinblick auf die Abwasserzusammensetzung, wie Reduzierung der anfallenden Frachten und Reduzierung des Anteils an absetzbaren Stoffen, als auch die Kosten der anschließenden Abwasserbehandlung sinnvoll.

Anfallende absetzbare Stoffe sind durch Installation einer Siebung zum Rückhalt der Grobstoffe wie Scherben, Etiketten, Treber, Kronkorken etc. zu reduzieren.

Wie bereits beschrieben, weist das anfallende Abwasser Schwankungen des pH-Wertes im Wesentlichen bedingt durch die erforderlichen Reinigungsprozesse auf, was eine Neutralisation sowohl bei Ableitung ins öffentliche Kanalnetz als auch bei anaerober Abwasserbehandlung erforderlich macht. Als Neutralisationsverfahren können die Durchlaufneutralisation, Neutralisation mit Rauchgas oder Gärungskohlensäure sowie mit Natronlauge/Säuren (Problem Salzbelastung ist zu berücksichtigen) genannt werden. Misch- und Ausgleichsbecken finden häufig Anwendung zur Vergleichmäßigung von Mengen- und Konzentrationsschwankungen.

Die Auswirkungen durch verwendete Reinigungsmittel ist sowohl in Hinblick auf Inhaltsstoffe als auch gewählte Behandlungsverfahren, insbesondere Hemmung anaerober Prozesse zu berücksichtigen.

Gängige Verfahren zur Abwassereinigung in Brauereien sind Neutralisation, Misch- und Ausgleichsstufe, aerobe und insbesondere anaerobe biologische Reinigungsprozesse.

4.2.4.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens

In den für diese Studie ausgewerteten Direkt- bzw. Indirekteinleiterdatenbanken NIKLAS-IGL (2010) und INKA (2010) sind vereinzelt Betriebe aus der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens verzeichnet. Für eine umfassende Darstellung der Branchenstruktur sind die hier vorhandenen Informationen allerdings nicht ausreichend. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2009 bundesweit 1.331 Braustätten betrieben. In Nordrhein-Westfalen sind davon 131 Betriebe ansässig. Der deutschlandweite Bierabsatz betrug im Jahr 2009 knapp 100 Mio. hl VB, wobei der von der Branche in Nordrhein-Westfalen produzierte Anteil in etwa 24 % ausmachte (24,2 Mio. hl VB) (DESTATIS, 2010). Bei einer erheblichen Anzahl der 131 in NRW betriebenen Braustätten handelt es sich um kleinere Betriebe, die nur einen geringen Anteil der Verkaufsbiermenge produzieren. Die 14 Absatzstärksten Unternehmen der Region West brauen dahingegen mit ca. 17 Mio. hl VB etwa 74 % der in NRW hergestellten Verkaufsbiermenge (BRAUWELT, Nr. 21-22, 2010). Für die nachfolgend dargestellte Berechnung möglicher Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung dieser Branche wurden die 8 größten Unternehmen in Nordrhein-Westfalen betrachtet (vgl. Tabelle 14). Diese haben mit einer Produktmenge von ca. 14.1 Mio. hl immerhin noch etwa 63 % des im Jahr 2009 produzierten Verkaufsbieres hergestellt. Für die Reinigung des in den nordrhein-westfälischen Brauereien anfallenden Abwassers wird nur an einem Standort eine anaerobe Verfahrenstechnik zur Vorbehandlung eingesetzt (Betrieb H). Aufgrund vorhandener Betriebs- und Anlagenkenntnisse wird die Größe dieses Unternehmens als Schwelle für den wirtschaftlich und verfahrenstechnisch sinnvollen Einsatz von Anaerobtechnik für die Abwasserreinigung bei Brauereien angesehen. Der geringfügig kleinere Betrieb F wird bei der in dieser Studie durchgeführten Potenzialabschätzung noch berücksichtigt.

Tabelle 14: Zusammenstellung der absatzstärksten Brauereien Nordrhein-Westfalens für das Jahr 2009

	Jahresproduktion ¹⁾ [Mio. hl Getränk/a]	abgeschätzte CSB-Schmutzfracht [t CSB/a]	Bewertung
Betrieb A	5,24	4.194	Potenzial vorhanden
Betrieb B	2,32	1.858	Potenzial vorhanden
Betrieb C	2,26	1.806	Potenzial vorhanden
Betrieb D	1,24	992	Potenzial vorhanden
Betrieb E	1,06	848	Potenzial vorhanden
Betrieb F	0,58	464	Potenzial vorhanden
Betrieb G	0,73	584	Potenzial vorhanden
Betrieb H	0,63		Anaerobanlage vorhanden

¹⁾ Quelle: BRAUWELT, Nr. 21-22 (2010)

4.2.4.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens

Für die Berechnung des in der Abwasserreinigung der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens vorhandenen möglichen Energieeinsparpotenzials werden die in Tabelle 14 aufgelisteten 7 Großbetriebe ohne Anaerobanlage betrachtet. Für die weitere Bilanzierung wird die innerhalb dieser Betriebe anfallende CSB-Jahresschmutzfracht zu insgesamt 10,75 Mio. kg CSB/a angenommen. Erneut erfolgt die Abschätzung des möglichen Einsparpotenzials über den Verfahrensvergleich einer rein aeroben, biologischen Behandlung gegenüber einer kombinierten Verfahrenskette mit weitgehend anaerobem Umsatz der organischen Schmutzfrachten. Für beide Varianten wurde eine mechanische Vorbehandlung nur in sehr geringem Umfang berücksichtigt ($\eta_{\text{CSB}} = 6\%$, $\eta_{\text{BSB}} = 10\%$). Aufgeschlüsselt sind die Ergebnisse dieser Vergleichsbetrachtung für die Betriebe A bis G in nachstehender Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 6 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 10 \%$)	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 6 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 10 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf		
<i>Betrieb A</i>	4.307.000 kWh/a	861.000 kWh/a
<i>Betrieb B</i>	1.908.000 kWh/a	382.000 kWh/a
<i>Betrieb C</i>	1.855.000 kWh/a	371.000 kWh/a
<i>Betrieb D</i>	1.019.000 kWh/a	204.000 kWh/a
<i>Betrieb E</i>	871.000 kWh/a	174.000 kWh/a
<i>Betrieb F</i>	477.000 kWh/a	95.000 kWh/a
<i>Betrieb G</i>	600.000 kWh/a	120.000 kWh/a
Belüftungsenergiebedarf in Summe	11.037.000 kWh/a	2.207.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		8.830.000 kWh/a
Methanproduktion		
<i>Betrieb A</i>		906.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb B</i>		401.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb C</i>		390.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb D</i>		214.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb E</i>		183.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb F</i>		100.000 m ³ CH ₄ /a
<i>Betrieb G</i>		126.000 m ³ CH ₄ /a
Methanproduktion in Summe:		2.320.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		8.124.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe		16.954.000 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾	18.897.503 kWh/a	(10.068.590 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		9.749.000 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

Unter der Annahme, dass an allen 7 Produktionsstandorten zukünftig eine kombinierte Verfahrenstechnik mit anaerober Vorbehandlungsanlage umgesetzt wird, lässt sich der für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr zur aeroben Belebungsstufe notwendige Bedarf an elektrischer Belüftungsenergie von ca. 11,04 Mio. kWh/a um annähernd 8,83 Mio. kWh/a auf 2,21 Mio. kWh/a entscheidend reduzieren. Dieses Energieeinsparpotenzial gestaltet sich unter Berücksichtigung einer energetischen Verwertung der innerhalb des

Anaerobprozesses anfallenden Methangasmenge noch vorteilhafter. Fasst man die Betriebe A bis G zusammen, wird eine Methangasgesamtmenge von ca. 2,32 Mio. m³ CH₄/a produziert. Bei einer Verstromung des anfallenden Biogases mittels BHKW-Anlage entspricht diese Gasmenge einer möglichen Stromerzeugung von etwa 8,12 Mio. m³/a. Dabei anfallende Wärmeenergie wird auch hier nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, diese Energie für den anaeroben Reinigungsprozess innerhalb der Betriebe zu nutzen.

4.2.5 Zuckerindustrie

4.2.5.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Zuckerindustrie

Die Produktion von Zucker erfolgt in Deutschland in der Zeit von September bis Dezember, in der Zeit der Rübenernte. Zur Verarbeitung von einer Tonne Rüben sind bis zu siebzehn Kubikmeter Wasser erforderlich. Eine grundlegende Zusammenstellung des Zuckergewinnungsprozesses gibt das Merkblatt DWA-M 713 (2007) wieder. Als wesentliche Betriebseinheiten einer Zuckerfabrik sind der Bereich Rübenhof (Annahme, Zwischenreinigung, Reinigung und Waschen der Rüben), Zerkleinerung und Extraktion, Abpressung, Schnitzel-Trocknung sowie Saftreinigung, Saftedickung, Kristallisation und Zucker-Weiterverarbeitung zu nennen.

Abwasseranfallstellen sind der Rübenhof mit den Schwemm- und Waschwässern, die Schnitzel-Trocknung beim Einsatz von Venturi-Wäschern für das Abgas aus der Hochtemperaturkochung bzw. die Verdampfungstrocknung durch die Kondensation der abgezogenen Brüden. Zudem ist noch Abwasser aus dem überschüssigen Kondensat bei der Saftedickung sowie gegebenenfalls bei der Weiterverarbeitung des Zuckers zu beispielsweise Zuckerkulör oder Fruktose zu erwarten. Reinigungswässer fallen nur unregelmäßig, überwiegend am Schluss der Kampagne an. Beim Abwasseranfall sollten zwei wesentliche Ströme unterschieden werden; ein hoch belasteter Strom aus dem Schwemmwasserkreislauf und ein gering belasteter aus dem Überschusskondensat mit Ammonium-Stickstoff als Hauptverunreinigung.

Eine grobe Beschreibung des Abwasseranfalls in Zuckerfabriken wurde von Jördening (2000) wie nachfolgend beschrieben gegeben.

Tabelle 16: Richtwerte für Abwasser aus Zuckerfabriken (Jördening, 2000)

Richtwerte für Abwasser aus Zuckerfabriken	Einheit	Werte
Spez. Abwasseranfall	m ³ /t Rüben	17
BSB ₅ -Konzentration	mg/l	4.000 – 18.000
CSB-Konzentration	mg/l	6.000 – 30.000
N _{ges}	mg/l	50 - 180

Der größte Teil des CSB wird durch den Transport und die Wäsche der Rüben verursacht. In den vergangenen Jahren erfolgten einige wesentliche Vermeidungsmaßnahmen, die zur Reduzierung der Frachten führen sollen, unter anderem die Vorreinigung bei der Ernte, die Verminderung von Rübenbruch sowie die trockene Rübenentladung und Rübentransport. Der Stickstoff liegt im Wesentlichen als Ammoniumstickstoff vor.

Das Abwasser aus Zuckerfabriken ist organisch hoch belastet. Als angewandte Abwassereinigungsverfahren sind Teichverfahren (belüftet und unbelüftet), anaerobe Verfahren sowie Belebtschlammverfahren zu nennen.

Heute haben sich die Anaerobanlagen als erste Stufe der Behandlung durchgesetzt und die Mehrzahl deutscher Zuckerfabriken ist damit ausgerüstet. Dabei verwendete Systeme sind das Kontaktschlammverfahren, UASB-Reaktoren sowie Fließbettverfahren.

4.2.5.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Zuckerindustrie Nordrhein-Westfalens

Derzeit gibt es in Deutschland 4 Unternehmen, die in 20 Zuckerfabriken Rüben zu Zucker verarbeiten. Unter diesen 4 Großunternehmen ist ein niederländisches Unternehmen vertreten, das nur eine einzelne Fabrik in Deutschland betreibt. Im gesamten Bundesgebiet wurden im Wirtschaftsjahr 2009/2010 auf einer Fläche von ca. 364.000 ha in etwa 26 Mio. t Rüben angebaut. Diese wurden an den 20 Standorten zu ungefähr 4,23 Mio. t Zucker verarbeitet. Während der etwa vier Monate andauernden Verarbeitungskampagne (September bis Januar) wurden somit pro Tag und Fabrik grob geschätzt ca. 11.660 t Rüben verarbeitet (Wirtschaftliche Vereinigung Zucker, Verein der Zuckerindustrie, 2011).

Für Nordrhein-Westfalen wichtige Standorte des Zuckerrübenanbaus sind insbesondere das südliche Niedersachsen und ein Teil des Rheinlandes (Köln-Aachener Bucht). Von den 20 deutschen Zuckerfabriken liegen 5 Werke in NRW. Der in Nordrhein-Westfalen verarbeitete Rübenanteil bzw. die hier produzierte Zuckermenge kann zu ca. 25 % der deutschlandweiten Produktionsmengen abgeschätzt werden. Von den 5 nordrhein-westfälischen Zuckerfabriken gehören 4 Werke zu einem Großunternehmen. Bei diesen 4 Zuckerfabriken handelt es sich aus abwassertechnischer Sicht um Direkteinleiter, die auch in der entsprechenden Direkteinleiterdatenbank NIKLAS-IGL (2010) aufgeführt sind. Für eine Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der nordrhein-westfälischen Zuckerfabriken ist ganz entscheidend, dass anaerobe Vorbehandlungsanlagen in diesen 4 Werken bereits betrieben werden.

4.2.5.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Zuckerindustrie Nordrhein-Westfalens

Das branchenspezifische Energieeinsparpotenzial in der Abwasserreinigung der Zuckerindustrie NRWs wird aus verfahrenstechnischer Sicht als eher gering eingeschätzt. 80 % der Fabriken verfügen bereits über eine anaerobe Vorbehandlung. Für das fünfte Werk, bei dem es sich um den einzigen Indirekteinleiter der Branche handelt, wurde bereits eine Machbarkeitsstudie zur energetischen Nutzung des industriellen Abwassers im Verbund mit dem kommunalen Abwasseranfall durchgeführt. Als unterschiedliche Szenarien wurden hier: 1) die aerobe Mitbehandlung des vorbehandelten Abwassers der Zuckerfabrik auf der kommunalen Anlage (inkl. einer Erweiterung der kommunalen Faulung), 2) der Bau einer anaeroben Behandlungsanlage für die Zuckerfabrik in Kombination mit einer notwendigen Erweiterung der kommunalen Faulung, 3) die anaerobe Mitbehandlung des Erdtransportwassers in der kommunalen Schlammfäulung, sowie 4) der Neubau einer Faulungsanlage auf dem Gelände der kommunalen Kläranlage zur Behandlung der kommunalen Klärschlämme und des Erdtransportwassers der Zuckerfabrik betrachtet. Für die Ergebnisse der Untersuchungen bzw. die ausgesprochenen Handlungsempfehlungen sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht der durch das MKULNV geförderten Machbarkeitsstudie (ISA, 2007) verwiesen.

An diesem Beispiel bzw. den unterschiedlichen Varianten, die in der Machbarkeitsstudie untersucht wurden, lässt sich allerdings gut aufzeigen, dass eine reine Betrachtung des Energieeinsparpotenzials insbesondere bei indirekteinleitenden Industriebetrieben nur als der erste Schritt einer möglichen Optimierung verstanden werden kann. Für die maßgebende wirtschaftliche Bewertung und die konkrete verfahrenstechnische Umsetzung ist hier zu-

sätzlich den Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen industrieller/betrieblicher und der jeweiligen kommunalen Abwasserreinigung besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

4.2.6 Hefeindustrie

4.2.6.1 **Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Hefeindustrie**

In der Hefeindustrie fällt Abwasser an verschiedenen Produktionsstellen in Abhängigkeit der hergestellten Produkte an. Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Produktionsverfahren sind dem Merkblatt ATV-DWK-M 778 „Abwasser aus Hefefabriken und Melassebrennereien“ (November 2003) zu entnehmen. Der Abwasseranfall ist davon abhängig, welche Rohstoffqualität eingesetzt wird und wie viel Alkohol produziert wird. Zudem sind die Wassermengen zum Hefe waschen und die Höhe der Melasseverdünnung beeinflussend wirksam, sodass erhebliche Unterschiede bezüglich Abwassermenge und -konzentrationen in den einzelnen Betrieben zu verzeichnen sind. Der das Abwasser belastende Stoff ist auf die Melasse zurückzuführen. Wesentliche Abwasseranfallstellen sind der Melasseschlamm, enthefte Würze, gegebenenfalls Schlempe sowie die gering belasteten Ströme Hefewaschwasser und Filtrat.

Die nachstehende Tabelle gibt Richtwerte der spezifischen Mengen für verschiedene Teilströme bei der Backhefeproduktion aus Melasse an.

Tabelle 17: Abwasserteilströme bei der Backhefeproduktion aus Melasse

Teilstrom	Spez. Mengen (m ³ /t Melasse*)
Melasseschlamm	0,05
Enthefte Würze	4,0 - 6,0
Separationswaschwasser	1,8 - 2,7
Filtrat	0,8 - 1,2

**Nicht berücksichtigt wurde das in unterschiedlichen Mengen anfallende Reinigungs- und Spülwasser*

Ein Überblick zu Abwasserkonzentrationen im Gesamtabwasser sowie im Bereich enthefte Würze ist nachstehender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 18: Spezifische Abwasserkennwerte aus der Hefeproduktion

Konzentrationsbereiche Hefefabriken	Einheit	Konzentrationsbereich Gesamtabwasser	Konzentrationsbereich enthefte Würze
CSB	mg/l	15.500 - 23.200	25.000 - 42.000
BSB ₅	mg/l	11.500 - 17.200	20.000 - 30.000
TOC	mg/l	-	12.000 - 21.000
KN	mg/l	1.200 - 1.600	-
TN _b	mg/l	-	2.000 - 3.700
(NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N)	mg/l	150 - 220	-
P _{ges}	mg/l	15 - 40	20 - 80
SO ₄ -S	mg/l	400 - 3.200	-
pH-Wert	-	4,5 - 6,5	-

Aus der Tabelle geht hervor, dass das Konzentrationsverhältnis der Abwasserinhaltsstoffe von BSB₅:N:P zu ca. 100:10:0,2 ist. Daraus wird deutlich, dass für einen biologischen Abbau der Stickstoffanteil zu hoch ist.

Da die Abwasserqualität durch viele Einflussfaktoren verändert wird, wurden im Merkblatt ATV-DVWK-M 778 „Abwasser aus Hefefabriken und Melassebrennereien“ (November 2003) spezifische Schmutzfrachten für den CSB in Abhängigkeit der einzelnen Verfahren dargestellt.

Tabelle 19: Spezifische Schmutzfrachten für das Abwasser aus der Hefeproduktion in Abhängigkeit einzelner Produktionsverfahren (ATV-DVWK-M 778, 2003)

Prozess	Einheit	Spez. CSB-Fracht	
		Mittel	Max
Alkoholfreie Hefeproduktion	kg/t	156	190
Hefe- und Alkoholproduktion nach dem Hefelüftungsverfahren	kg/t	180	210
Alkoholproduktion nach dem Dickmaisverfahren	kg/t	210	230

Das Abwasser aus Hefefabriken weist einen erhöhten Anteil an Sulfat, teilweise auch einen geringen pH-Wert auf, was zu Korrosionsschäden führen kann. Zudem ist eine ausreichende Belüftung zur Verhinderung von Zersetzungsprozessen erforderlich. Grundsätzlich ist bei der Mitbehandlung in kommunalen Kläranlagen die zügige Vermischung mit kommunalem Abwasser zur Vermeidung anaerober Prozesse vorzusehen. Aufgrund der mögli-

cherweise negativen Auswirkungen auf die geforderten CSB-Ablaufwerte (schwer abbaubarer CSB) sollte der Anteil des Abwassers am Gesamtstrom einer Kläranlage jedoch nicht über 25% liegen. Insgesamt gibt es einen positiven Einfluss auf die Denitrifikation.

Bei der Direkteinleitung wird teilweise das Verfahren der mehrstufigen Eindampfanlage (Aufkonzentrierung auf einen Trockenrückstand von 75%), bei dem das salzfreie Kondensat als Futterzusatz verwertet wird, durchgeführt. Wesentliche Nachteile dieses Verfahrens sind die hohe Investition sowie erhebliche Energiekosten. Anaerobe Verfahren erscheinen aufgrund der hohen CSB Gehalte als sinnvoll, haben jedoch sowohl den Nachteil der erforderlichen Gasreinigung aufgrund der hohen Sulfatgehalte, als auch der erforderlichen Nachschaltung einer aeroben Stufe zur Reduzierung des Stickstoffgehaltes. Sinnvoll ist dieses Verfahren nur im Bereich der Vorbehandlung einzusetzen. Im Bereich der Alkoholherstellung wird bei einem Drittel der Betriebe die Verwertung in der Landwirtschaft durchgeführt. In Deutschland wird in der Regel das Abwasser aus Hefefabriken zwecks biologischer Reinigung in kommunale Kläranlagen geleitet.

4.2.6.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Hefeindustrie Nordrhein-Westfalens

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es derzeit 6 Unternehmen, die in 7 Produktionsstätten Hefe herstellen (Deutscher Verband der Hefeindustrie e.V., 2011 und ATV-DVWK-M 778, 2003). Laut Statistischem Bundesamt (2003) wurden im Jahr 2002 bundesweit in der Branche etwa 108.000 t Backhefe produziert.

Die durchgeführte Recherche ergab, dass von den 6 Hefeherstellern ein Großunternehmen mit zwei Produktionsstandorten in Nordrhein-Westfalen ansässig ist. Nach Informationen aus der Direkteinleiterdatenbank NIKLAS-IGL (2010) leitet dieses Unternehmen an einem dieser Standorte das anfallende Produktionsabwasser nach betriebseigener Reinigung direkt ein. Detaillierte Betriebsdaten wie Produktionszahlen bzw. Abwasseranfallmengen sind hier jedoch nicht zugänglich, sodass eine genauere Beschreibung der Branche für Nordrhein-Westfalen nicht möglich ist. Insgesamt ist die vorhandene Datenbasis über die Hefeindustrie Nordrhein-Westfalens als sehr gering bzw. unsicher zu bewerten.

4.2.6.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Hefeindustrie Nordrhein-Westfalens

Aufgrund der unsicheren Datenbasis ist eine Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die Hefeindustrie in Nordrhein-Westfalen nur schwer möglich. Aus Verfahrenstechnischer Sicht wird allerdings nur ein geringes Energieeinsparpotenzial erwartet, da das oben genannte Unternehmen am Hauptproduktionsstandort bereits seit 1986 Anaerobtechnik zur Abwasservorbehandlung einsetzt. Hier liegen langjährige Betriebserfahrungen über den erfolgreichen Einsatz anaerober Verfahrenstechnik für die Abwasserreinigung in der Hefeindustrie vor. Diese resultierten an obigem Produktionsstandort in einer zweifachen Kapazitätserweiterung der ursprünglichen Anaerobanlage. Die derzeitige Ausbaugröße wird mit etwa 9,5 t CSB/d abgeschätzt.

4.2.7 Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe

4.2.7.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben

In Schlachtbetrieben ist der gesamte Produktionsablauf, vom Ort der Anlieferung der Schlachttiere bis zu den Lager- und Kühlräumen, mit Abwasseranfall verbunden. Eine Zusammenstellung wesentlicher Produktionsverfahren sowohl für Schlachtbetriebe als auch fleischverarbeitende Betriebe und Zerlegebetriebe sind dem Merkblatt ATV-M 767 „Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben“ (Januar 1992) zu entnehmen. Da bei Schlachtbetrieben eine Vielzahl unterschiedlicher Reststoffe anfallen, sollte das Merkblatt ATV-M 770 „Behandlung und Verwertung von Reststoffen aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben“ (November 1995) berücksichtigt werden. Dort wird unterschieden zwischen primären Reststoffen, die während der Produktion anfallen, und sekundären Reststoffen, die bei der Abwasser- und Abluftbehandlung anfallen. Die primären Reststoffe werden in drei Linien unterteilt. Die grüne Linie umfasst die Wagenwäsche und Stallungen, die rote Linie die Schlachtung und Zerlegung und die gelbe Linie die Kuttellei und Magen-, Darm- und Pansenentleerung. Als wesentliche Abwasseranfallstellen sind in Schlachtbetrieben das entladen, aufstallen und reinigen der Schlachttiere, das Entbluten und Enthäuten, Schwemmtransporte bei Geflügelschlachtung, Spalten und Abspülen der Tierkörper, Grob- und Feinerlegung, Kühlen und Lagern sowie das Reinigen und Desinfizieren der Arbeitsräume, Geräte, Ställe und Fahrzeuge zu nennen. Die Abwasserzusammensetzung hängt neben der Art und Menge der verarbeiteten Tiere wesentlich von dem Stand der produktionsintegrierten Maßnahmen zum Rück-

halt der verschiedenartigen Abfälle sowie Konzentrate (Blut, Gewebeflüssigkeit) ab (Fries und Schrewe, 2000).

Eine detaillierte Beschreibung des Abwasseranfalls und der darin enthaltenen Schmutzfrachten und Konzentrationen anhand von Kennzahlen können aufgrund der erheblichen Schwankungsbreite in diesem Betriebszweig nur als Orientierungshilfe dienen. In der folgenden Tabelle 20 sind die aus dem Niedersächsischen Wasseruntersuchungsamt in Hildesheim (Herausgeberjahr unbekannt) angegebenen spezifischen Abwassermengen und Schmutzfrachten bei Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben dargestellt.

Tabelle 20: Spezifische Abwassermengen und Schmutzfrachten bei Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben (Niedersächsisches Wasseruntersuchungsamt Hildesheim, aus Fries und Schrewe, 2000)

Parameter	Einheit	Schlachtung		Verarbeitung
		Rind	Schwein	Schwein
Untersuchungstage	d	3	7 (19)**	12
Spez. Abwassermenge	l/T*	400 - 700	100 (58 - 254)**	420 - 1.520
Absetzbare Stoffe	l/T gTS/T	2 - (12) 60 -360	1 - 18 (0,2 - 1,9)** 30 - 80 (8 - 65)**	1 - 6
BSB _{5, hom}	mg/l	1.600 -(2.450)	260 - 850 (70 - (430))**	-
BSB _{5, sed}	mg/l	1.400 - 2.200	240 - 750 (60 - 366)**	450 - 610
CSB _{sed}	mg/l	1.860 - 3.480	340 - (1.080) (80 - 430)**	410 - 850

*T = Bezugseinheit = Tier; ** () Klammerwerte sind Schlachtung ohne Darmschleimerei*

Zudem sind im Abschlussbericht „Untersuchungen zum Stand der Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Lebensmittelindustrie unter Zugrundelegung der EG-IVU-Richtlinie und Entwicklung von BVT-Merkblättern“ des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover (ISAH, 2004) spezifische Abwassermengen und Schmutzfrachten (ohne Federvieh) wiedergegeben. Die Daten umfassen die Werte, mit denen bei sorgfältigem Einhalt der derzeit üblichen Maßnahmen zum produktionsintegrierten Umweltschutz (insbesondere weitgehendem Rückhalt von Blut, Pansen- und Darminhalten, Fetten und Darmschleim) für einzelne Produktionsbereiche der Fleischwirtschaft zu rechnen ist.

Tabelle 21: Spezifische Abwassermengen und Schmutzfrachten für einzelne Produktionsbereiche der Fleischwirtschaft (ISAH, 2004)

Bezugseinheiten für Schacht- und Fleischverarbeitungs- betriebe	Spez. Abwassermenge	Spezifische Schmutzfracht	
	I/E	BSB _{5, sed} (mg/l)	CSB _{sed} (mg/l)
Schlachtung einer Großvieheinheit (insb. Rinder)	500 - 1.000	1.000 - 3.500	1.400 - 5.000
Schlachtung einer Kleinvieheinheit (insb. Schweine)	100 - 300	200 - 350	300 - 600
Verarbeitung einer Großvieheinheit (insb. Rinder)	1.000 - 1.500	1.000 - 1.400	1.400 - 2.000
Verarbeitung einer Kleinvieheinheit (insb. Schweine)	300 - 400	300 - 400	400 - 600
Zerlegen von 1.000 kg Fleisch in Zerlegebetrieben	150 - 170	75 - 100 ¹⁾	100 - 150 ¹⁾
Verarbeitung von 100 kg Schlachtgewicht in Fleischwarenfabriken	500 - 700	700 - 900	1.000 - 1.300
Schleimen von 100 Schlägen Därmen ²⁾	2.000 - 5.000	9.000 - 25.000	13.000 - 28.000

Grundsätzlich weist das Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben eine starke Fäulnisfähigkeit auf, sodass eine Vorbehandlung sinnvoll ist. Grobstoffe sind möglichst schnell dem Abwasser zu entnehmen. Die Entnahme erfolgt in der Regel in Abhängigkeit des Abwasserstroms. Für Abwasserströme aus der grünen Linie (Abschwemm- und Waschwasser aus Wagenwäsche und Stallungen) werden hauptsächlich Siebe mit einer Maschenweite von 1 mm eingesetzt, während der rote Linie (Fleischverarbeitungsabwasser) gegebenenfalls den Einsatz von einem Feinrechen (Stababstand 20 mm) und nachgeschaltetem Feinsieb erfordern. Fette und Öle fallen in unterschiedlichen Verarbeitungsbereichen an, der Einbau von Fettabscheidern sollte möglichst am Anfallort erfolgen (Fries und Schrewe, 2000).

Zur verbesserten Entnahme von Fett- und Grobstoffen werden Flotationsanlagen eingesetzt, wobei zwischen der mechanischen Flotation und der Entspannungsflotation bzw. der Dispersionsflotation zu unterscheiden ist. Die Wirkungsgrade liegen je nach Ausführung bei ca. 35 % BSB₅-Abnahme bei der mechanischen Flotation bis zu 85 % BSB₅-Abnahme bei der chemisch physikalischen Flotation. Das anfallende Flotat kann sowohl einer anaeroben Behandlung (Energieerzeugung) als auch der Kompostierung zugeführt werden. Misch- und Ausgleichsbecken können zum Ausgleich von Spitzen, je-

doch nur mit ausreichender Belüftung zur Verhinderung von Geruchsproblemen, eingesetzt werden. Anaerobanlagen haben sich in Deutschland für diesen Betriebszweig bisher nicht durchgesetzt. In Deutschland ist die Einleitung des Produktionsabwassers nach unterschiedlich durchgeführter Vorbehandlung in kommunale Entwässerungssysteme und anschließend in mechanisch biologische Kläranlagen vorrangig. Zu berücksichtigen sind dabei die teilweise hohen Temperaturen sowie Stoßbelastungen und der Einfluss von Reinigungs- und Desinfektionsmitteln.

4.2.7.2 **Branchenstruktur und Abwassersituation der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens**

Dominiert wird die Branche der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe in Nordrhein-Westfalen, wie im gesamten Bundesgebiet, durch einige wenige Großbetriebe, die den maßgebenden Anteil der insgesamt geschlachteten Tiere bzw. der verarbeiteten Fleischmenge auf sich vereinen. Laut Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit sind derzeit in Nordrhein-Westfalen 306 Schlachtbetriebe zugelassen (BVL, 2011). Bei der überwiegenden Mehrheit dieser Unternehmen handelt es sich allerdings um Kleinbetriebe, die oftmals nur unregelmäßig schlachten bzw. deren Anteil an der insgesamt in Nordrhein-Westfalen geschlachteten bzw. verarbeiteten Fleischmenge gering ist.

Für das Jahr 2010 weist das statistische Landesamt (IT.NRW, 2011) eine Schlachtmenge der gewerblichen Schlachtungen von Tieren inländischer und ausländischer Herkunft in Höhe von insgesamt ca. 2,11 Mio t/a auf. Schweineschlachtungen (ca. 1,89 Mio. t/a) machen dabei den überwiegenden Anteil an der Gesamtschlachtmenge aus. In geringerem Umfang (ca. 0,22 Mio. t/a) fällt dabei die Schlachtung von Rindern (inklusive Kälber) ins Gewicht. Es ist kein in Nordrhein-Westfalen ansässiges bzw. produzierendes Großunternehmen aus der Geflügelindustrie bekannt.

Die Darstellung der branchenspezifischen Abwassersituation muss auch an dieser Stelle über eine Hochrechnung basierend auf spezifischen Werten erfolgen. Zwar sind Betriebsdaten einzelner Großbetriebe bekannt, für eine detaillierte Beschreibung der gesamten Branchen reichen diese bzw. die öffentlich zugänglichen Informationen nicht aus. Unter Berücksichtigung spezifischer Werte für den Abwasseranfall (Ansatz: 1,8 m³/t Schwein, 2,4 m³/t Rind, Faktor 2,0 für gemeinsame Betrachtung von Schlachtung und Weiterverarbeitung) wird die jährlich anfallende Abwassermenge für die Branche auf etwa 7,86 Mio. m³/a abgeschätzt. Aufgrund der Anzahl der in Nordrhein-Westfalen durchgeführten gewerblichen Schlachtungen wird die anfallende CSB-

Jahresschmutzfracht für die Branche zu ca. 40.000 t CSB/a angenommen. Eine Unterscheidung zwischen Schlachtbetrieben und fleischverarbeitenden Betrieben kann auf der vorhandenen Datenbasis nicht durchgeführt werden. Da zumindest die maßgebenden Großunternehmen beides betreiben, wird die anhand der Schlachtzahlen ermittelte CSB-Schmutzfracht mit einem Faktor 2,5 erhöht (Ansatz aufgrund von Betriebserfahrungen).

Anaerobe, biologische Reinigungsverfahren im Vollstrom, d.h. als anaerobe Vorbehandlungsstufe sind bei Schlacht- bzw. Fleischverarbeitungsbetrieben nur schwierig umzusetzen. Für Nordrhein-Westfalen ist keine in dieser Branche betriebene anaerobe Vorbehandlungsanlage bekannt. In der Regel wird das anfallende Abwasser mit Hilfe einer mechanischen Vorbehandlung (Grobfiltration bzw. Siebung und teilweise Flotation) und einer anschließenden aeroben, biologischen Behandlung (oftmals auf der kommunalen Anlage) gereinigt. Wesentliche Unterschiede in gängigen Verfahrenskonzepten bestehen allerdings in der Wirksamkeit der mechanisch/physikalischen Vorbehandlung. Diese reicht von einer kaum wirksamen Grobfiltration (einfache Siebung) bis hin zu einer sehr leistungsstarken chemisch unterstützten Flotation. Eine nachgeschaltete anaerobe Behandlung des anfallenden Flotatschlammes in Form einer Co-Fermentation wird teilweise praktiziert. Für eine Abschätzung möglicher Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung dieser Branche ist ganz entscheidend, wie viel organische Schmutzfracht in der Vorbehandlung (Grobfiltration, Flotation) nicht abgeschieden wird und somit in einer nachfolgenden aeroben, biologischen Reinigung behandelt werden muss.

Mindestens zwei der Großunternehmen in Nordrhein-Westfalen betreiben auf den betrieblichen Abwasserreinigungsanlagen bereits leistungsstarke chemisch unterstützte Flotationsanlagen und führen den Flotatschlamm als Co-Fermentat den kommunalen Faulungsanlagen zu. Aufgrund vorhandener Branchenkenntnisse wird angenommen, dass mit dieser Verfahrensvariante ca. 50 % der gesamten CSB-Jahresschmutzfracht, also etwa 20.000 t CSB/a abgedeckt sind.

Für die restlichen Betriebsstätten in Nordrhein-Westfalen wird angenommen, dass etwa 20 % der CSB-Jahresschmutzfracht mit einer Siebung und einfach betriebenen Flotation (ohne Zugabe von Fällungs- und Flockungshilfsmitteln) vorbehandelt und im Anschluss aerob gereinigt wird. Für weitere 20 % der anfallenden CSB-Jahresschmutzfracht wird davon ausgegangen, dass betrieblich nur eine einfache Grobfiltration (Siebung) der aeroben, biologischen Reinigung (überwiegend kommunal) vorgeschaltet ist. Für eine Betrachtung möglicher Energieeinsparungen in der Abwasserreinigung ergeben sich für diese beiden Varianten (jeweils für ca. 8.000 t CSB/a) unterschiedlich groß ausge-

prägte Potenziale. Um die Vielzahl von kleineren Schlacht- bzw. Fleischverarbeitungsbetrieben in Nordrhein-Westfalen ausreichend zu berücksichtigen, wird bei etwa 10 % der CSB-Jahresschmutzfracht (4.000 t CSB/a) davon ausgegangen, dass aufgrund der Betriebsgröße keine über eine evtl. eingesetzte Grobfiltration (Siebung) hinausgehende Abwasserreinigungsstufe wirtschaftlich umsetzbar ist. Dieser Anteil der CSB-Jahresschmutzfracht wird daher bei der Beurteilung möglicher Energieeinsparpotenziale vollständig vernachlässigt.

4.2.7.3 **Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens**

Für die Ermittlung vorhandener Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens wird über einen Vergleichsverfahren abgeschätzt, inwieweit sich die aerob zu behandelnde organische Schmutzfracht durch eine gesteigerte Vorklärung mittels chemisch unterstützter Flotation verringern lässt. Aufgrund der Branchenstruktur in Nordrhein-Westfalen werden hier Einsparpotenziale bei der Behandlung von etwa 16.000 t CSB/a Jahresschmutzfracht gesehen. Diese sind in nachstehender Tabelle 22 zusammengestellt. Durch eine Erweiterung einer reinen Grobfiltration (Siebung) um eine leistungsstarke, zusätzliche, chemisch unterstützte Flotation (Variante 1) lässt sich die in einer nachfolgenden aeroben Behandlung zu reinigende organische Schmutzfracht von ca. 4,11 Mio. t BSB₅/a auf etwa 0,82 Mio. t BSB₅/a reduzieren. Die für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr in die Belebungsstufe benötigte Belüftungsenergie lässt sich entsprechend von 8,22 Mio. kWh/a um 6,57 Mio. kWh/a auf etwa 1,64 Mio. kWh/a reduzieren. Für Variante 2 lässt sich durch die Erweiterung einer konventionell betriebenen Vorbehandlung mittels einfacher Flotation auf eine chemisch unterstützte Flotation, betrieben unter Zugabe von Fällungs- und Flockungshilfsmitteln, ebenfalls eine deutliche Menge an Belüftungsenergie einsparen. Hier ergibt sich eine Verminderung der nötigen Energie von 5,48 Mio. kWh/a um ca. 3,83 Mio. kWh/a ebenfalls auf den minimierten Wert von etwa 1,64 Mio. kWh/a. Somit ergibt sich für die Branche insgesamt ein Einsparpotenzial hinsichtlich der Belüftungsenergie von ca. 10,41 Mio. kWh/a.

Methan- bzw. Biogasproduktion durch Co-Fermentation des Flotatschlammes ist generell möglich und bietet zusätzliches Einsparpotenzial, wird allerdings in dieser Studie nicht berücksichtigt, da eine genaue Spezifizierung des Ertrags ganz wesentlich von den örtlichen Randbedingungen abhängt (z. B. von vorhandenen Kapazitäten in kommunalen Faulbehältern etc.).

Tabelle 22: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich VARIANTE 1	Grobfiltration (Siebung) + aerobe biologische Abwasserreinigung	chem./phys. Flotation + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	Grobfiltration ($\eta_{\text{CSB}} = 7,5 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 10 \%$)	chem./phys. Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 80 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 80 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr (Bezug: 8.000 t CSB/a)	8.216.000 kWh/a	1.643.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		6.573.000 kWh/a
Methanproduktion aus Co-Fermentation des Flotatschlammes		1.421.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		4.973.000 kWh/a
Verfahrensvergleich VARIANTE 2	Grobfiltration/Flotation + aerobe biologische Abwasserreinigung	chem./phys. Flotation + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	mechanisch/Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 35 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 40 \%$)	chem./phys. Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 80 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 80 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr (Bezug: 8.000 t CSB/a)	5.478.000 kWh/a	1.643.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		3.834.000 kWh/a
Methanproduktion aus Co-Fermentation des zusätzlichen Flotatschlammes		864.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		3.024.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe (Var. 1 + Var. 2)		18.404.000 kWh/a
mögliche CO₂-Emissionseinsparung (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		10.582.000 kg CO₂/a

4.2.8 Tierkörperverwertung

4.2.8.1 **Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in Tierkörperverwertungsbetrieben**

Bei der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte fällt Abwasser bei jedem Schritt innerhalb des Verarbeitungsbetriebes an. Die speziellen zur Anlieferung benötigten Container sowie alle nachfolgend mit der Rohware in Berührung kommenden Oberflächen, Behältnisse etc. müssen aus seuchenhygienischen Gründen gründlich gereinigt werden. Bei der weiteren Verarbeitung der Rohware, die in drei Gefahrenkategorien eingeteilt ist, ist nach einer Zerkleinerung auf 50mm, eine Sterilisation der gesamten Masse durch die Druckbehandlung bei 3 bar, einer Temperatur von 133°C und einer Dauer von 20 Minuten gesetzlich in der EG-Verordnung Nr. 1774 (EG, 2002) vorgeschrieben. Das im weiteren Produktionsverlauf angewandte Trockenverfahren wird in Europa von 90% der Verarbeitungsbetriebe tierischer Nebenprodukte eingesetzt, wobei bei der der Sterilisation angeschlossenen Trocknung und dem Brüdeniederschlag in Kondensatoren, 50-90% des Abwassers anfallen. Im Merkblatt DWA-M-710 „Abwasser aus der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte“ (2008) werden die gängigen Produktionsverfahren dieser Branche dargestellt. Als spezifischer Abwasseranfall wird in der Branche der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte die Erzeugung von 1,2 m³ Abwasser pro behandelte Tonne Rohmaterial angenommen. Diese Angaben sowie die in Tabelle 23 aufgeführten durchschnittlichen Schadstofffrachten sind dabei entscheidend von dem zu verarbeitenden Rohmaterial abhängig. Einfluss hat hierbei die Art des Rohmaterials, also welche tierischen Nebenprodukte von welchem Tier verarbeitet werden, und vor allem in welchem Zustand dieses ist. Bei langen Transportwegen in ungekühlten Containern, bei Unterbrechungen der Kühlkette oder längeren Lagerzeiten vor der Verarbeitung (besonders bei erhöhten Außentemperaturen im Sommer) setzen Faulungsprozesse ein, die die Schadstofffrachten im Abwasser erheblich erhöhen. Weiterhin haben die Betriebsgröße, das eingesetzte Produktionsverfahren bzw. die Verfahrenstechnik sowie der Grad der vorherigen Verarbeitung von Mägen, Därmen und Pansen Einfluss auf Abwasseranfall und -beschaffenheit. Charakteristisch für Abwasser aus Tierkörperverwertungsbetrieben sind hohe Schadstoffbelastungen, besonders durch Kohlenstoff und Stickstoff.

Gängige Verfahrenskonzepte zur Reinigung des Abwassers in Tierkörperverwertungsbetrieben beinhalten in Deutschland derzeit zum größten Teil keine Anaerobtechnik. Es werden vorrangig vorgeschaltete/ simultane Denitrifikation, Belebung mit aerober/ anoxischer Kaskadenschaltung oder Verfahrenskombinationen aus biologischer und physikalisch-chemischer Stufe zur Stickstoffelimination eingesetzt.

Tabelle 23: Spezifische Abwasserparameter aus der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte (DWA-M 710, 2008) sowie Schadstofffrachten im Abwasser von Tierkörperverwertungsanlagen

Parameter	[kg/t]
BSB ₅	1,6 – 5,0
CSB	3,0 – 10
Stickstoff gesamt	0,6 – 1,0
Phosphor gesamt	< 0,1
Feststoffe	1,3 – 2,2

Durch hohe Fettanteile ist ein Fettabscheider zweckmäßig, ebenso wie eine Flotation. Außerdem ist aufgrund schwankender Anlieferungszeiten des Rohmaterials und stark schwankender Schadstofffrachten ein Misch- und Ausgleichsbecken in den Abwasserreinigungsprozess zu integrieren.

Wie oben aufgeführt findet die Abwasserreinigung bei Verarbeitungsbetrieben tierischer Nebenprodukte hauptsächlich über aerob/ anoxische Verfahren wie Nitrifikation/ Denitrifikation statt. Die für den Sauerstoffeintrag benötigte elektrische Energie stellt hierbei 70-75% des gesamten Energieverbrauchs der Abwasserreinigungsanlage dar. Dieser Energieverbrauch kann durch den Einsatz von anaeroben Reinigungsverfahren zu einem erheblichen Teil gemindert werden. Die für das Abwasser dieser Branche charakteristisch hohe Kohlenstoffbelastung erbringt durch die Behandlung in Anaerobreaktoren eine Einsparung im Sauerstoffbedarf und dadurch in der benötigten Belüftungsenergie und erzeugt gleichzeitig energetisch verwertbares Methan sowie im Produktionsprozess nutzbare Abwärme (z.B. in der Trocknung).

Zurzeit ist die anaerobe Vorbehandlung des Abwassers in der Branche zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte nicht verbreitet.

4.2.8.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Tierkörperverwertungsbetriebe Nordrhein-Westfalens

Der Abwasseranfall bei der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte ist direkt abhängig von der Menge an Tierschlachtungen und somit von der täglichen Nachfrage des Menschen nach dem Nahrungsmittel Fleisch, sei es für die eigene Nutzung oder in Form von Tierfutter. Laut Statistischem Bundesamt steigt in Deutschland sowie weltweit die Nachfrage nach Fleischprodukten stetig an. So erhöhte sich die Zahl der Schweineschlachtungen in Deutschland von 2008 auf 2009 um 2,7 % bzw. um 1,5 Millionen Tiere auf gesamt 56 Millionen. Die direkten Auswirkungen der ansteigenden Nettoerzeugung von

Fleisch stellen die Tierkörperverarbeitenden Betriebe sowie die daran angeschlossenen Kläranlagen vor neue Herausforderungen und verlangt nach effektiven und energiesparenden Lösungen.

Nordrhein-Westfalen weist laut Statistischem Bundesamt (2011) den größten Anfall an Schlachtmengen, nämlich 31,6% der bundesweiten Gesamtmenge, (Tabelle 24) und in diesem Zusammenhang mit Schlachtnebenprodukten /-abfällen auf. Da der überwiegende Anteil der Nebenprodukte (Pflichtware) innerhalb von gesetzlich geregelten Einzugsgebieten entsorgt werden muss, verfügt Nordrhein-Westfalen dementsprechend über die meisten Tierkörperverwertungsbetriebe. Der *Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH* nach befinden sich in Nordrhein-Westfalen 13 Betriebe zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte, über deren Größe oder Verarbeitungskapazitäten allerdings nichts Näheres bekannt ist.

Tabelle 24: Auszug aus „Schlachtungen und Fleischerzeugung im 1.Quartal 2011“ (Statistisches Bundesamt, 2011)

Bundesland	Gewerbliche Schlachtungen [t]
Baden-Württemberg	139.071
Bayern	202.405
Mecklenburg-Vorpommern	22.734
Niedersachsen	446.476
Nordrhein-Westfalen	520.618
Schleswig-Holstein	45.621
Deutschland gesamt	1.648.313

Von der Schlachtmenge fallen ca. 35 % als Rohmaterial für die Verwertung in Tierkörperverwertungsbetrieben an. Im 1. Quartal 2011 sind in Nordrhein-Westfalen 182.216 Tonnen an tierischen Nebenprodukten angefallen. Ausgehend von den jährlich anwachsenden Schlachtmengen wird das 1.Quartal 2011 repräsentativ für die Folgenden des Jahres herangezogen, so dass im Jahr 2011 voraussichtlich ca. 728.864 Tonnen an tierischen Nebenprodukten anfallen werden.

Es werden verschiedene Produkte in der Tierkörperverwertung produziert, die in Tabelle 25 jeweils mit ihrem Anteil an der Gesamtproduktionsmenge angegeben sind. Es konnten keine speziellen, betriebsspezifischen Daten für die Produktion in Nordrhein-Westfalen ermittelt werden.

Tabelle 25: Zusammenstellung typischer Produkte aus der Tierkörperverwertung

Produkt	Anteil an der Gesamt- produktionsmenge ¹⁾ [%]	voraussichtlich in NRW 2011 [t]
Tiermehl	34	247.813
Tierfett	19	138.484
Fleischknochenmehl	15	109.329
Knochenfett	5	36.443
Blutmehl	2	14.577
Federnmehl	1	7.288
Geflügelproteine	k.A.	k.A.

¹⁾ die Abweichung zu 100 % ist Abfall

Für das 1. Quartal 2011 bedeutet dies einen Abwasseranfall bei der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte von 624.741 m³, auf das Jahr hochgerechnet fallen in Nordrhein-Westfalen in dieser Branche ca. 2.500.000 m³/a Abwasser an.

TKV-Abwasser weist standardmäßig ein CSB:BSB₅-Verhältnis zwischen (1,3 – 1,6):1 auf und ein BSB₅:TKN-Verhältnis zwischen (3,5 – 4):1. Die starken BSB₅-Abweichungen lassen sich auf die unterschiedliche Geschwindigkeit der Fäulnisprozesse in Abhängigkeit von der Jahreszeit sowie Lagerungsdauer und -bedingungen zurückführen.

4.2.8.3 **Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Tierkörperverwertungsbetriebe Nordrhein-Westfalens**

Es ist keine sichere Zuordnung von Produktionsmengen und Abwasseranfall zu den Verarbeitungsbetrieben tierischer Nebenprodukte in Nordrhein-Westfalen möglich. Eine branchenspezifische Abschätzung des Energieeinsparpotenzials ist daher nicht möglich.

Auf Grundlage der Daten eines in Nordrhein-Westfalen ansässigen Schlüsselbetriebes zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte wird das Potenzial zur Energieeinsparung beispielhaft dargestellt. Die Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials erfolgt über einen Vergleich zwischen einer rein aeroben Abwasserreinigung und einer Kombination mit anaerober Vorbehandlung. In nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse dieser Betrachtung zusammengefasst. Es wird bei der Berechnung auf Grundlage der Daten des Beispielbetriebes von einer CSB-Fracht von 1.314 t CSB/ a ausgegangen.

Tabelle 26: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung anhand eines Beispielbetriebes zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	mechanisch / Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 30 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 35 \%$)	mechanisch / Flotation ($\eta_{\text{CSB}} = 30 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 35 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli.}	2 kWh/kg BSB _{eli.}
Belüftungsenergiebedarf für Schmutzfracht mit Potenzial für Anaerobtechnik (Bezug: 1.314 t CSB/a)	1.142 kWh/a	228 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		913 kWh/a
Methanproduktion		294 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		103 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe		1.016 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾ (Bezug: 1.314 t CSB/a)	1.955 kWh/a	(1.041 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		584 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

Grundsätzlich eignet sich das Abwasser von Tierkörperverwertungsbetrieben durch den hohen Kohlenstoffanfall sehr gut für eine anaerobe Vorbehandlung. Die für einen ausreichenden Sauerstoffeintrag benötigte, elektrische Belüftungsenergie lässt sich durch die anaerobe Vorbehandlung um etwa 913 kWh/a reduzieren. Gleichzeitig wird bei dem anaeroben Abbau der organischen Schmutzfracht 294 m³CH₄/a produziert, das sich in Form von Biogas und mittels einer BHKW-Anlage zu 103 kWh/a elektrischer Energie verstromen lässt.

Diese Werte spiegeln beispielhaft die Situation eines einzigen Betriebs von insgesamt 13 Verarbeitungsbetrieben tierischer Nebenprodukte in Nordrhein-Westfalen wieder. Da keine detaillierten Daten über die Größe und Verarbeitungsmenge des Rohmaterials der anderen Betriebe vorliegen, wird eine Hochrechnung auf das gesamte Einsparpotenzial für Nordrhein-Westfalen bewusst verzichtet.

4.3 Papierindustrie

4.3.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Papierindustrie

Die in der Papierindustrie eingesetzten Rohstoffe (Zell- und Faserstoffe) sind wasserunlöslich und sind somit nicht vollständig, sondern in Form der während der Produktion extrahierten Inhaltsstoffe im Abwasser enthalten. Eine grundlegende Zusammenstellung wesentlicher Produktionsverfahren gibt unter anderem der Entwurf des DWA-Merkblattes DWA-M 731 „Abwasser und Abfälle aus der Papierherstellung“ (2011) wieder. Der Rohstoffeinsatz bei der Papierherstellung liegt mit 60 % bei Altpapier, 6 % Holzstoff, 17 % Zellstoff und 17 % Mineralien und Additiven. Wasser ist bei der Papierherstellung von entscheidender Bedeutung sowohl als Transportmittel als auch Lösungsmittel. Das Wasser wird soweit möglich im Produktionsprozess im Kreislauf geführt, Abwasser fällt nur als überschüssiges, durch Frischwasser ersetztes Wasser an.

Aufgrund der unterschiedlichen Endprodukte können der spezifische Abwasseranfall sowie Abwasserkonzentrationen nur mit Angabe der Produktgruppe sowie des Sortenprogramms, wie in nachstehender Tabelle dargestellt, erfolgen.

Papierabwasser ist im Wesentlichen durch organische Stoffe belastet und biologisch gut abbaubar. Die Inhaltsstoffe umfassen in der Regel in Lösung gebrachte Komponenten des Faserrohstoffes. Stickstoff- und Phosphorverbindungen sind nur gering vorhanden, sodass eine Nährstoffzugabe bei biologischen Verfahren erforderlich ist. Der Anteil an Calcium erhöht sich durch den gestiegenen Einsatz von Calciumcarbonat sowie Optimierung der Kreislaufführung und kann zu erheblichen Problemen, wie Ausfällung und Verkrustung führen. Dieses ist durch Maßnahmen wie z.B. pH-Wert-Regelung zu vermeiden. Ein weiterer Inhaltsstoff ist das Sulfat, welches mit Konzentrationen bis zu 1.000 mg/l auftreten kann. Dieses führt zu Problemen bei anaeroben Behandlungsverfahren. Weiterhin können im Abwasser der Papierindustrie Inhalts-

stoffe wie Chloride und Additive in einer Größenordnung auftreten, die zu Störungen bei biologischen Prozessen führen.

Tabelle 27: Spezifische Kennwerte für Abwasseranfall und Schmutzfrachtkonzentrationen bei der Papierherstellung in Abhängigkeit von der Produktgruppe (DWA-M 731, 2011)

Produktgruppe	Sortenprogramm	Konzentrationen in mg/l			spez. Abw.-Menge	BSB ₅ /CSB
		BSB ₅	CSB	AOX	m ³ /t	Mittelwerte
Ungeleimte, Holzfreie Papiere	Tissue	50 - 100	95 - 270	0,55 - 1,90	9 - 25	0,39
	Dekorpapier	20 - 40	50 - 100	1,40 - 6,00	20 - 70	0,46
Geleimte, holzfreie Papiere	holzfreie Druckpapiere	65 - 220	150 - 400	0,60 - 2,35	5 - 20	0,45
	holzfreie Spezialpapiere	40 - 550	90 - 1.100	0,10 - 0,80	15 - 60	0,49
hoch ausgemahlene holzfreie Papiere und Spezialpapiere	hoch ausgemahlene holzfreie Papiere	10 - 30	20 - 60	0,05 - 0,15	100 - 250	0,45
	Spezialpapiere	10 - 40	45 - 110		50 - 100	0,34
Gestrichene holzfreie Papiere	Spezialpapiere	170 - 260	360 - 540	0,10 - 0,60	20 - 30	0,46
Holzhaltige Papiere	SC	125 - 480	450 - 1.020	0,12 - 0,24	13 - 20	0,36
	LWC	150 - 460	430 - 1.300	0,13 - 0,35	12 - 30	0,38
	holzhaltige Druckpap.	200 - 500	500 - 1.160	0,03 - 0,12	8 - 30	0,39
	Karton < 50 % AP	140 - 200	320 - 490		15 - 25	0,43
Überwiegend aus Altpapier (AP) hergestellte Papiere	Zeitungsdruckpapier	460 - 1.270	960 - 2.400	0,10 - 0,15	7 - 20	0,48
	Wellpappenroh papier	1.280 - 2.840	2.190 - 5.680	1,80 - 2,00	0 - 10	0,53
	Karton aus Altpapier	530 - 3.000	1.140 - 5.500	0,11 - 0,55	0 - 15	0,48
	Recyclingpapiere	250 - 400	540 - 790		10 - 20	0,51

Als mögliche Abwasserbehandlungsanlagen sind die chemisch-physikalische Vorbehandlung durch Sedimentationsanlagen, mehrstufige biologische Verfahren, bestehend aus einer aeroben oder anaeroben Hochlaststufe mit nachgeschalteter Schwachlaststufe sowie Membran- Bio-Reaktoren (MBR) zu nennen. Bei den biologischen Verfahren ist die verstärkte Blähschlamm- bildung dieses Abwassers zu berücksichtigen. MBR-Anlagen werden trotz erheblicher Vorteile aufgrund der Wirtschaftlichkeit nur sehr begrenzt eingesetzt. Für den wirtschaftlichen Einsatz anaerober Verfahren ist eine hohe CSB Konzentration erforderlich, die in der Papierindustrie lediglich bei Einsatz des Rohstoffes Altpapier gegeben ist (Bischofberger et al., 2005).

4.3.2 Branchenstruktur und Abwassersituation der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens

Nach Informationen des Verbandes Deutscher Papierfabriken (VdP, 2010) wurden bundesweit im Jahr 2010 etwa 23.2 Mio. t Papier hergestellt. Ergebnisse einer deutschlandweiten Umfrage zur Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie wurden von Jung et al. (2009) veröffentlicht. Etwa 20 % der gesamtdeutschen Papiererzeugung (ca. 4,5 Mio. t Papier) fallen laut Wirtschaftsverband der Rheinisch-Westfälischen Papiererzeugenden Industrie e.V. (2011) auf Nordrhein-Westfalen.

Diese Produktionsmenge verteilt sich nach Verbandsangaben in Nordrhein-Westfalen auf 30 Papierfabriken, die im Wesentlichen graphische Papiere, Verpackungspapiere, Hygienepapiere bzw. Papiere für technische und spezielle Verwendungszwecke herstellen. Für das Jahr 2007 sind in der Landesstatistik Nordrhein-Westfalens allerdings noch 59 Betriebe unter dem Wirtschaftszweig Papiergewerbe verzeichnet (Bild 7; IT.NRW, 2007). Als Betriebe mit eigener Abwasserreinigungsanlage sind hier jedoch ebenfalls nur 30 aufgeführt. Von diesen Betrieben werden 21 Betriebe in der Landesstatistik als Indirekteinleiter und 9 als direkteinleitende Betriebe geführt.

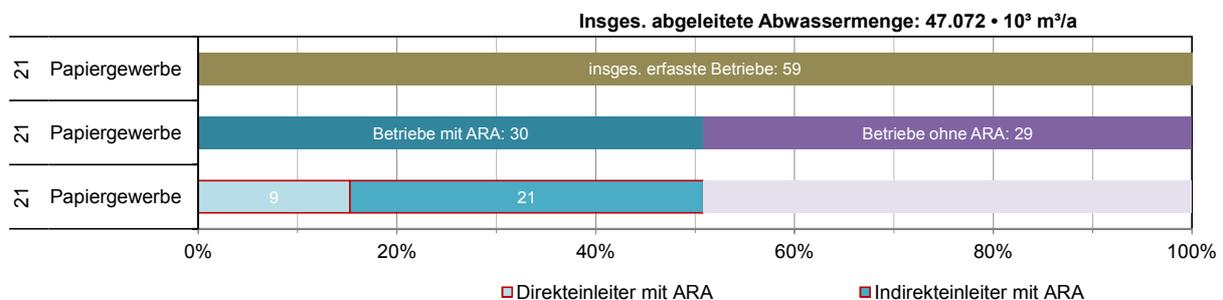


Bild 7: Anzahl der Betriebe, die im Wirtschaftszweig Papiergewerbe Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (IT.NRW, 2007); inklusive Unterscheidung zwischen Betrieben mit und ohne Abwasserreinigungsanlagen (ARA)

Neun direkteinleitende Papierfabriken mit eigener Abwasserreinigung finden sich ebenfalls in der durch das LANUV-NRW gepflegten Direkteinleiterdatenbank NIKLAS-IGL. Die insgesamt aus diesem Wirtschaftszweig abgeleitete Abwassermenge wird auf Grundlage der Informationen des statistischen Landesamtes auf etwa 47 Mio. m³/a abgeschätzt (Bild 8). Ungefähr 80 % dieser Wassermenge wird auf einer betrieblichen Abwasserreinigungsanlage vorbehandelt, wobei lt. Statistik ein erheblicher Anteil dieses Wassers direkt eingeleitet wird.

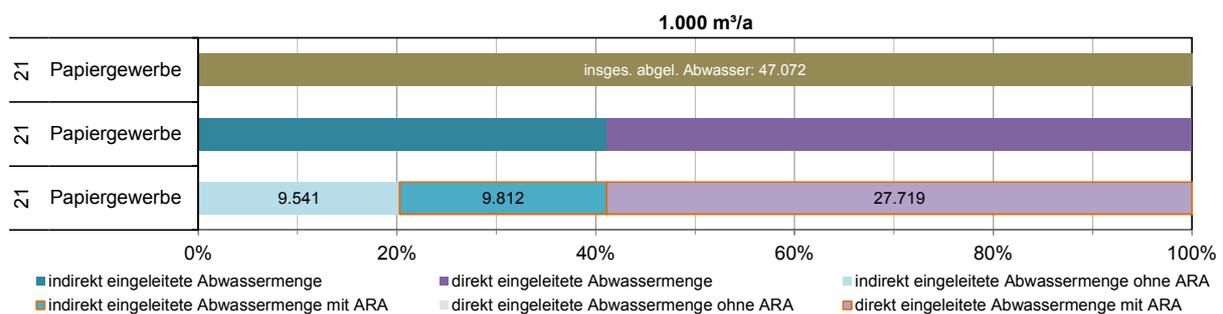


Bild 8: Im Wirtschaftszweig Papiergewerbe in Nordrhein-Westfalen nicht öffentlich beseitigte Abwassermenge für das Jahr 2007; inklusive Unterscheidung zwischen direkt und indirekt eingeleiteter Wassermenge (IT.NRW, 2007)

Unter Ansatz einer mittleren spezifischen CSB-Schmutzfracht von 20 kg CSB/t Papier (DWA-M 731, 2011) wird bei einer Jahresproduktion von 4,5 Mio. t Papier die branchenspezifisch anfallende CSB-Jahresschmutzfracht für die Papierindustrie Nordrhein-Westfalen auf ca. 90.000 t CSB/a abgeschätzt. Eine genauere Erfassung der anfallenden Schmutzfracht ist an dieser Stelle nicht möglich, da firmenspezifische Produktionszahlen und Informationen über die spezifischen Produktpaletten der einzelnen Unternehmen nicht im ausreichenden Umfang vorliegen.

Für die Ermittlung des möglichen Energieeinsparpotenzials über einen Vergleich aerober und anaerober Reinigungstechnologie ist insbesondere der aus Altpapier hergestellte Anteil der Gesamtproduktion interessant. Wie in Tabelle 27 dargestellt sind hier die anfallenden CSB-Konzentrationen vergleichsweise hoch und somit vorteilhaft für den Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung. Auf Basis bundesweiter Zahlen zur Rohstoffverarbeitung in der Papierindustrie wird der Anteil des aus Altpapier hergestellten Produktes auch für Nordrhein-Westfalen zu etwa 60 % angenommen. Die bei der Verarbeitung dieser Rohstoffgruppe anfallende und somit für den Einsatz von Anaerobtechnik interessante CSB-Jahresschmutzfracht verringert sich somit auf etwa 54.000 t CSB/a.

Aufgrund von Branchenkenntnissen wird angenommen, dass derzeit in NRW 10 anaerobe Vorbehandlungsanlagen zur Abwasserreinigung in der Papierindustrie betrieben werden. Insgesamt sind die bekannten Anaerobanlagen auf eine Belastung von etwa 90 t CSB/d ausgelegt. Für die Ermittlung möglicher Energieeinsparpotenzial durch einen Verfahrensvergleich wird die anaerob vorbehandelte CSB-Jahresschmutzfracht folglich mit 31.500 t CSB/a angenommen (Ansatz: 350 Produktionstage pro Jahr). Dies entspricht in etwa 58 % der in Nordrhein-Westfalen anfallenden CSB-Jahresschmutzfracht aus der Verarbeitung von Altpapier.

4.3.3 Energieeinsparpotenziale in der Abwasserreinigung der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens

Die hier durchgeführte Abschätzung des Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens basiert wieder auf einer Vergleichsbetrachtung zwischen einer rein aeroben, biologischen Reinigung des anfallenden Produktionsabwassers und einem kombinierten Ansatz mit anaerober Vorbehandlung. Als Vorbedingung für den wirtschaftlich vorteilhaften und verfahrenstechnisch sinnvollen Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung ist hier wiederum eine ausreichend hohe organische Belastung des Abwasserstroms. Aus diesem Grund wird ein mögliches Energieeinsparpotenzial durch den Betrieb einer anaeroben Vorbehandlung nur für die Reinigung der CSB-Jahresschmutzfracht aus der Altpapierverarbeitung berücksichtigt. Wenn die in Nordrhein-Westfalen vorhandene Kapazität der bereits betriebenen Anaerobanlagen abgezogen wird, ergibt sich hier eine branchenspezifische CSB-Jahresschmutzfracht von etwa 22.500 t CSB/a für die der Einsatz von Anaerobtechnik möglich erscheint.

Unter Berücksichtigung einer mechanisch/physikalischen Vorbehandlung (Wirkungsgrad: $\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$ bzw. $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$) ergibt sich für den rein aeroben Abbau der organischen Schmutzfracht von 22.500 t CSB/a ein Belüftungsenergiebedarf für eine ausreichende Sauerstoffzufuhr zur Belebung von ca. 18,55 Mio. kWh/a. Durch den Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung lässt sich der für die dann um etwa 75 % reduzierte CSB-Schmutzfracht benötigte Belüftungsenergiebedarf auf ungefähr 3,71 Mio. kWh/a verringern. Hieraus ergibt sich für die Behandlung von 22.500 t CSB/a und bezogen auf die reine Belüftungsenergie ein Einsparpotenzial von ca. 14,84 Mio. kWh/a. Durch die Verstromung der gesamten bei einer anaeroben Umsetzung der organischen Schmutzfracht anfallenden Methangasmenge von etwa 4,86 Mio. m³ CH₄/a kann zusätzlich elektrische Energie in einer Größe von 17,01 Mio. kWh/a gewonnen werden. Die bei einer energetischen Gasverwer-

tung anfallende Wärmeenergie wird auch hier in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Tabelle 28: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens

Verfahrensvergleich	aerobe biologische Abwasserreinigung	anaerobe Vorbehandlung + aerobe biologische Abwasserreinigung
berücksichtigte Vorbehandlung	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$)	mechanisch ($\eta_{\text{CSB}} = 10 \%$, $\eta_{\text{BSB}} = 15 \%$)
spezifischer Energiebedarf für ausreichende Sauerstoffzufuhr	2 kWh/kg BSB _{eli}	2 kWh/kg BSB _{eli}
Belüftungsenergiebedarf für Schmutzfracht mit Potenzial für Anaerobtechnik (Bezug: 22.500 t CSB/a)	18.551.000 kWh/a	3.710.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial (Belüftungsenergie, elektr.)		14.841.000 kWh/a
Methanproduktion		4.860.000 m ³ CH ₄ /a
mögliche Stromerzeugung ($\eta_{\text{elektr.}} = 35 \%$)		17.010.000 kWh/a
Energieeinsparpotenzial in Summe		31.851.000 kWh/a
geschätzter KA-Gesamtenergiebedarf ¹⁾ (Bezug: 22.500 t CSB/a)	31.766.000 kWh/a	(16.925.000 kWh/a)
mögliche CO₂-Emissionseinsparung (Ansatz: 0,575 kg CO_{2e}/kWh)		18.314.000 kg CO₂/a

¹⁾ Der Anteil der Belüftungsenergie am Energieverbrauch für die aerobe biologische Behandlung wurde mit 80 % und der Anteil des Energieverbrauchs für die aerobe biologische Behandlung am Gesamtenergieverbrauch zu 73 % abgeschätzt.

4.4 Chemische Industrie

Die Chemische Industrie nimmt in Nordrhein-Westfalen gemessen an Umsatz und Beschäftigtenzahl einen hohen Stellenwert ein. Im Jahr 2006 machte der Umsatzanteil der Chemischen Industrie in NRW beispielsweise 32,5% des bundesweiten Gesamtumsatzes aus (Angabe der Chemieverbände NRW).

Die Chemische Industrie zählt auch unter Umweltgesichtspunkten zu den wichtigsten Branchen. Mit 18 % am gesamten Sonderabfallaufkommen liegt die Branche an 2. Stelle in NRW (Stand 2005, aus Leitfaden Chemische Industrie).

Vom MKULNV wurde die Erstellung eines Leitfadens zur medienübergreifenden Betrachtung der Vermeidung und Verwertung von Abfällen und Abwasser in Produktionsanlagen der Chemischen Industrie beauftragt (MUNLV-NRW, 2008). Anhand dieses Leitfadens kann die Prüfung des Standes der Technik (zur Vermeidung und Verwertung) bei zukünftigen Genehmigungsverfahren durchgeführt werden.

Im Leitfaden wird die Vorgehensweise zur Erstellung einer Stoffstromanalyse erläutert. Beispiele für durchgeführte Stoffstromanalysen und für Maßnahmen zur Minimierung des Abfall- und Abwasseraufkommens werden vorgestellt. Es wird eine Checkliste abgeleitet, die Anlagenbetreibern und Genehmigungsbehörden die Prüfung der Kriterien zur Definition des Standes der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen und Abwasser ermöglichen soll. Mit dem Leitfaden wird den Betrieben der Chemischen Industrie ein Werkzeug in die Hand gegeben, das ihnen ermöglicht, gezielt die Anforderungen des Vermeidungs- und Verwertungsgebotes abzuarbeiten.

Die im Rahmen des Vorhabens identifizierten Hauptanlagen und AVN (Anlagenteile, Verfahrensschritte, Nebeneinrichtungen) der Chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen sind in Tabelle 29 zusammengestellt.

Aus dieser Zusammenstellung ist die Vielfalt und Vielzahl der Hauptanlagen und AVN ersichtlich. Dies, sowie die unterschiedlichen Schwerpunkte der Produktion erschweren eine Einschätzung zu erzielbaren Energieeinsparpotenzialen in der Abwasserbehandlung. Zur Abschätzung des gesamten Energieeinsparpotenzials für die Branche wären detaillierte Recherchen erforderlich. Solche Untersuchungen müssten anlagenbezogen erfolgen.

Ein Beispiel für eine solche anlagenbezogene Prüfung und Bewertung verschiedener Varianten zur Abwasserbehandlung aus einem Alkylierbetrieb ist im Leitfaden aufgeführt. Hier ergaben die Variantenvergleiche in der ersten Ausbaustufe einen Vorteil für eine energetische Verwertung nach chemisch/physikalischer Stofftrennung. Nach Erweiterung der Produktion ergab sich für die zweite Ausbaustufe dagegen ein Vorteil für eine anaerobe Abwasserbehandlung und somit für die Realisierung möglicher Energieeinsparpotenziale. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass differenzierte Einzel- falluntersuchungen notwendig sind, um konkrete Energieeinsparpotenziale ermitteln zu können.

Tabelle 29: Anlagen nach Nr. 4 des Anhangs der 4. BImSchV in NRW (Stand 31.12.2008, aus: Leitfaden Chemische Industrie, MUNLV-NRW, 2008)

Anl.-Nr.	Anlagenbezeichnung	Haupt- anlagen	A.V.N- Anlagen	Gesamt [Anzahl]
4.1	Herstellung von chemischen Stoffen (allgemein)	20	4	24
4.1 a	Herstellung von Kohlenwasserstoffen	34	11	45
4.1 b	Herstellung von sauerstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen	121	18	139
4.1 c	Herstellung von schwefelhaltigen Kohlenwasserstoffen	4		4
4.1 d	Herstellung von stickstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen	35	25	60
4.1 e	Herstellung von phosphathaltigen Kohlenwasserstoffen	6	2	8
4.1 f	Herstellung von halogenhaltigen Kohlenwasserstoffen	14	5	19
4.1 g	Herstellung von metallorganischen Verbindungen	31	3	34
4.1 h	Herstellung von Basiskunststoffen (Kunstharzen, Polymeren, Chemiefasern, Fasern auf Zellstoffbasis)	111	9	120
4.1 i	Herstellung von synthetischen Kunststoffen	12		12
4.1 j	Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten sowie von Ausgangsstoffen für Farben und Anstrichmittel	6	1	7
4.1 k	Herstellung von Tensiden	20	1	21
4.1 l	Herstellung von Gasen wie Ammoniak, Chlor und Chlorwasserstoff, Fluor und Fluorwasserstoff, Kohlenstoffoxiden, Schwefelverbindungen, Stickstoffoxiden, Wasserstoff, Schwefeldioxid, Phosgen	37	10	47
4.1 m	Herstellung von Säuren wie Chrom-, Fluss-, Phosphor-, Salpeter-, Salz- oder Schwefelsäure, Oleum, schweflige Säuren	19	3	22
4.1 n	Herstellung von Basen wie Ammonium-, Kalium- oder Natriumhydroxid	4	1	5
4.1 o	Herstellung von Salzen wie Ammoniumchlorid, Kaliumchlorat, Kaliumkarbonat, Perborat, Silbernitrat	21	1	22
4.1 p	Herstellung von Nichtmetallen, Metalloxiden oder sonstigen anorganischen Verbindungen wie Kalziumkarbid, Silizium, Siliziumkarbid, anorganischen Peroxide, Schwefel	32	6	38
4.1 q	Herstellung von P-, N- oder K-haltigen Düngemitteln	2		2
4.1 r	Herstellung von Ausgangsstoffen für Pflanzenschutzmittel und von Bioziden	11		11
4.1 s	Herstellung von Grundarzneimitteln (Wirkstoffen für Arzneimittel)	21	28	49
4.1 t	Herstellung von Explosivstoffen		1	1
4.2	Umgang mit Pflanzenschutz- oder Schädlingsbekämpfungsmitteln oder ihren Wirkstoffen	6	1	7
4.3	Herstellung von Grundarzneimitteln (Wirkstoffen für Arzneimittel) mit Mikroorganismen	11	1	12
4.4	Verarbeitung von Erdöl und Erdölzerzeugnissen ...	45	46	91
4.5	Herstellung von Schmierstoffen	27		27
4.6	Herstellung von Ruß	7		7
4.7	Herstellung von Kohlenstoff und Elektrographit	7	5	12
4.8	Aufarbeitung organischer Lösemittel	10	6	16
4.9	Erschmelzen von Natur- oder Kunstharzen	2	2	4
4.10	Herstellung von Anstrich- oder Beschichtungsstoffen (Fimis, Lacke, Dispersionsfarben, Lasuren) oder Druckfarben	21		21
	Summer aller Anlagen der Nr. 4 der 4. BImSchV	697	190	887

In einer Stoffstromanalyse (siehe Bild 9) sind vor der Konzeption von Abwasserbehandlungsanlagen Vermeidungsmöglichkeiten zu prüfen. Das empfohlene Vorgehen zur Stoffstromanalyse in Hinblick auf das Abwasser ist in nachstehendem Bild dargestellt.

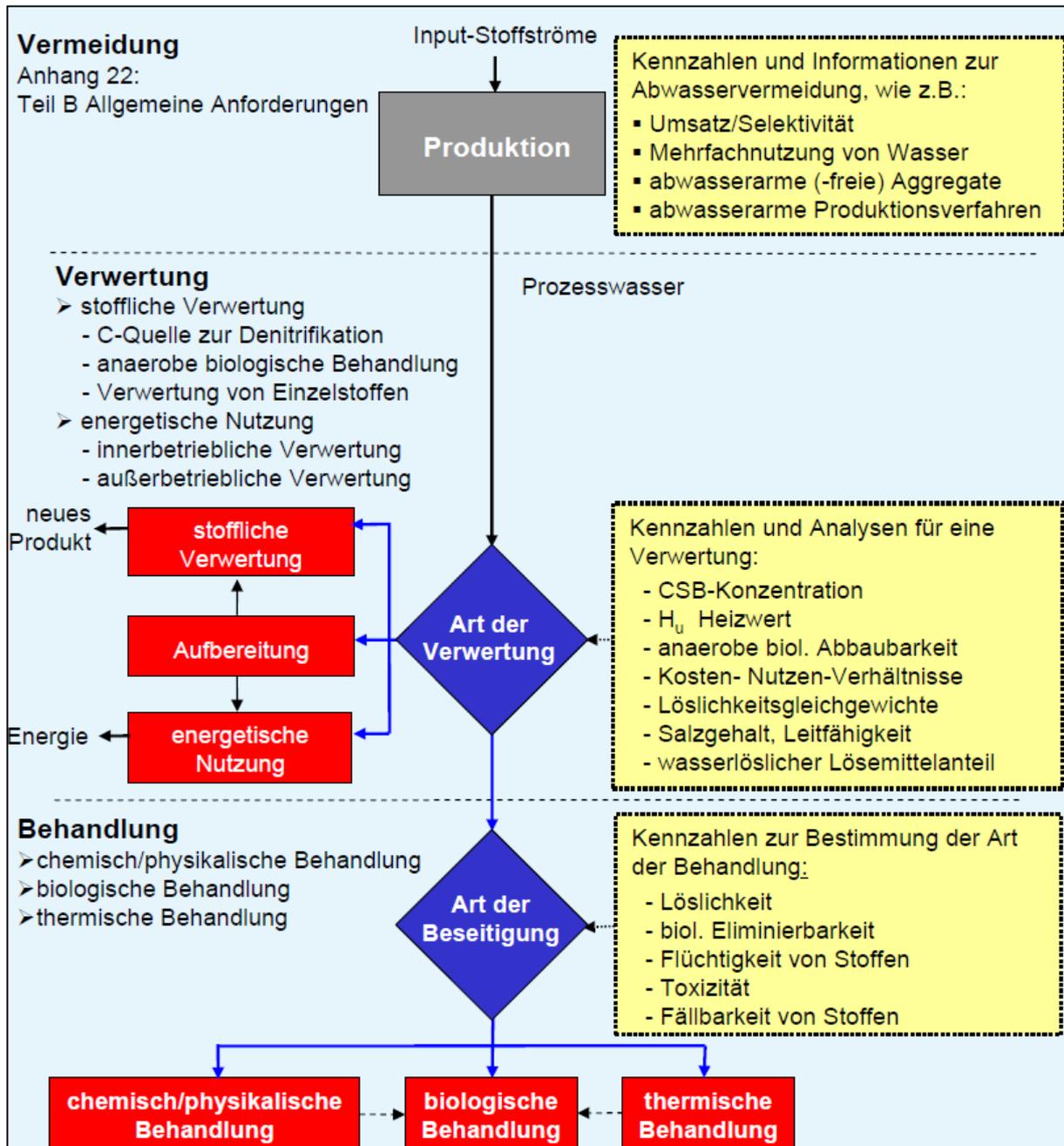


Bild 9: Vereinfachtes Schema einer möglichen Struktur zum Abwassermanagement (aus: Leitfaden Chemische Industrie, MUNLV-NRW, 2008)

4.4.1 Abwasseranfall, -beschaffenheit und gängige Reinigungsverfahren in der Chemischen Industrie

Abwasseranfall und Abwasserbeschaffenheit sind in der Chemischen Industrie stark geprägt von den Einsatzstoffen und von den Herstellungsprozessen. Ein umfassender Überblick über die Abwassersituation der Chemischen Industrie in NRW kann aufgrund der oben dargestellten besonderen Verhältnisse in der Chemischen Industrie nicht gegeben werden.

Gängige Reinigungsverfahren in der Chemischen Industrie sind mechanisch-physikalische Verfahren wie Neutralisation, Fällung/Flockung, Flotation etc. sowie biologische Verfahren verschiedener Technologien (z. B. aerobes Belebtschlammverfahren, Turmbiologie, Membran-Belebungsverfahren).

Ein Beispiel für eine in NRW eingesetzte Verfahrenskombination zur Abwasserbehandlung in der pharmazeutischen Industrie ist folgendes Konzept:

- Öl-/Fettabscheidung
- Siebung
- Belüftete Misch- und Ausgleichsbecken
- Flockung/Fällung, bedarfsweise Neutralisation und Vorklärung
- Aerobstufe 1 (Belebung und Zwischenklärung)
- Aerobstufe 2 (Belebung und Nachklärung)
- Sandfiltration

Wesentliche Kriterien für die Festlegung des Konzeptes waren die starken Schwankungen in der Abwasserzusammensetzung und hohe Anforderungen an die Ablaufqualität (Direkteinleiter). Ziel der mehrstufig ausgeführten Aerobanlage mit vorgeschalteter Flockung/Fällung ist der Schutz der Biozönose, insbesondere der Nitrifikanten, vor hemmenden oder toxischen Abwasserinhaltsstoffen. Die Kläranlage hält die geforderten Ablaufwerte sicher ein. Fragestellungen der Energieoptimierung waren bei der Anlagenkonzeption hier der Verfahrenssicherheit unterzuordnen. Anhand des Beispiels wird deutlich, dass insbesondere für heterogen zusammengesetztes Abwasser der Chemischen Industrie detaillierte Einzelfalluntersuchungen notwendig sind.

In der Chemischen Industrie sind energetische Einsparpotenziale gegenüber der derzeitigen Situation in bisher aerob behandelten Teilströmen zu erwarten. Hier wiederum ist zu differenzieren zwischen potenziell anaerob behandelbaren Teilströmen und ggf. stark Stickstoff haltigen Teilströmen, bei denen energetische Einsparpotenziale durch die Verfahren der Nitritation/Denitritation oder Deammonifikation erzielbar wären.

Eine mögliche Anwendung der Anaerobtechnik ist zu prüfen für Industriebetriebe, in deren Produktionsabwasser hohe organische Frachten zu erwarten sind. Dabei kann die organische Abwasserbelastung aus den eingesetzten Rohstoffen, oder auch aus den Stoffwechselprodukten von Verarbeitungsprozessen stammen. In einem zweiten Schritt ist die anaerobe Abbaubarkeit zu bewerten. Hinweise dazu geben die Veröffentlichungen der DWA Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“ (DWA-IG-5.1, maßgebliche Veröffentlichungen sind im Literaturverzeichnis angeführt). International sind Anwendungen der Anaerobtechnik in der Chemischen Industrie bekannt z. B. in Anwendungen der Kunststoffindustrie.

Großtechnische Anaerobanlagen in NRW sind bekannt für die Anwendungen:

- Biokraftstoffproduktion: derzeit eine Anaerobanlage in Nordrhein-Westfalen in Betrieb
- Alkylierbetrieb (siehe oben genanntes Beispiel)

Generelle Potenziale für Energieeinsparungen der Abwasserbehandlung dieser Branche werden insbesondere in der möglichen Verfahrenskombination der Anaerobtechnik mit der Deammonifikation gesehen. Bisher aufgrund der Stickstofffrachten anaerob nicht wirtschaftlich behandelbare Teilströme können so künftig verfahrenstechnisch optimiert werden. Anlagenbezogene Untersuchungen sind zur weiteren Einschätzung möglicher Anwendungen und Potenziale zu empfehlen.

5 Gesamtbetrachtung für Nordrhein-Westfalen

Die Ermittlung und Darstellung von Energieeinsparpotenzialen in der Abwasserreinigung ausgewählter Industriebranchen Nordrhein-Westfalens stellt den Kern der hier durchgeführten Studie dar. Im Fokus der Betrachtung stehen hierbei Industriebranchen, die für organisch hoch belastetes Produktionsabwasser bekannt sind. Im Einzelnen wurden 8 verschiedenen Bereiche aus der Ernährungsindustrie sowie die Papierindustrie und die Chemische Industrie untersucht. Soweit möglich wurden die Strukturen der jeweiligen Industriebranchen, die Abwassersituation sowie daraus resultierende Energieeinsparpotenziale in den vorhergehenden Kapiteln detailliert dargestellt.

Anhand der verfügbaren Datengrundlage ist es nicht möglich, den Energiebedarf für die gesamte industrielle Abwasserreinigung Nordrhein-Westfalens umfassend bzw. vollständig zu ermitteln. Die vorab ermittelten Energieeinspar- und -optimierungspotenziale lassen sich somit zu einer solchen, landesweiten Gesamtzahl nicht in Bezug setzen.

In nachstehender Tabelle 30 sind die branchenspezifisch ermittelten Energieeinspar- bzw. -optimierungspotenziale für eine Gesamtbetrachtung zusammenfassend dargestellt. Um die Aussagekraft der in Tabelle 30 dargestellten Ergebnisse besser einschätzen zu können, wird hier ebenfalls eine Bewertung der recherchierten Datenbasis vorgenommen. Diese Bewertung berücksichtigt allein eine Einschätzung zur Qualität der verfügbaren Daten. Eine Einschätzung und Bewertung des konkret realisierbaren Energieeinsparpotenzials lässt sich hierüber nicht ableiten. Diese Bewertung muss im Rahmen einer detaillierten Planung im Einzelfall erfolgen.

Die in Tabelle 30 vorgenommene Bewertung der Datenbasis erfolgt anhand von 4 Kategorien. Diese sind wie folgt definiert:

- „Sehr gute Datenbasis“, d.h. detaillierte Betriebsdaten sowie Informationen zu Abwasserfrachten und eingesetzter Reinigungsverfahrenstechnik sind für eine Vielzahl der Betriebe innerhalb der betrachteten Branche vorhanden. Betriebsspezifische Energieeinsparpotenziale lassen sich für eine Vielzahl der Abwasserreinigungsanlagen ermitteln und werden für die Gesamtbetrachtung der Branche summiert.
- „gute Datenbasis“, d.h. gute Kenntnisse über die Branche, über anfallende Abwassermengen und Schmutzfrachten sowie über die typischerweise eingesetzte Verfahrenstechnik sind vorhanden. Detaillierte Betriebsdaten sind für einzelne Schlüsselbetriebe bekannt.

Tabelle 30: Gesamtbetrachtung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung ausgewählter Industriebranchen für Nordrhein-Westfalen

Branche	Bewertung der vorhandenen Datenbasis	branchenspezifisch abgeschätzte Energieeinsparpotenziale			mögliche CO ₂ -Emissions-einsparung [kg CO ₂ /a]
		Einsparpotenzial durch reduzierten Belüftungsenergiebedarf [kWh/a]	mögl. Energieerzeugung durch Verstromung von Biogas [kWh/a]	Energieeinsparpotenzial in Summe [kWh/a]	
Ernährungsindustrie					
Milchverarbeitung	befriedigend	2.457.000	2.594.000	5.051.000	2.904.000
Erfrischungsgetränke-, Fruchtsaftindustrie und Mineralbrunnen	gut	4.665.000	4.277.000	8.942.000	5.142.000
Stärkeindustrie	befriedigend	7.242.000	5.909.000	13.151.000	7.562.000
Brauwirtschaft	sehr gut - gut	8.830.000	8.124.000	16.954.000	9.749.000
Zuckerindustrie	sehr gut - gut	Kein weiteres Einsparpotenzial durch Umstellung auf Anaerobtechnik ersichtlich!			
Hefeindustrie	gering	Aufgrund der Datenbasis ist keine branchenumfassende Bewertung möglich!			
Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe	befriedigend	7.997.000	10.407.000	18.404.000	10.582.000
Tierkörperverwertung	gering	Aufgrund der Datenbasis ist keine branchenumfassende Bewertung möglich!			
Papierindustrie	gut - befriedigend	14.841.000	17.010.000	31.851.000	18.314.000
Chemische Industrie	gering	Aufgrund der Datenbasis ist keine branchenumfassende Bewertung möglich!			
Gesamtbetrachtung Nordrhein-Westfalen		46.032.000	48.321.000	94.353.000	54.253.000

- „befriedigende Datenbasis“, d.h. Betriebsdaten sind vereinzelt vorhanden. In der Gesamtheit sind die Informationen ausreichend, um die Branchen in Nordrhein-Westfalen (z.B. über eine Gesamtproduktionsmenge) in groben Zügen abbilden zu können. Die Abschätzung möglicher Potenziale kann ausschließlich über spezifische Werte erfolgen.
- „geringe Datenbasis“, d.h. es konnten nur unzureichend Daten recherchiert werden, um die Branche in ihrer Gesamtheit abzubilden. Vorhandene Informationen sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. Eine aussagekräftige Abschätzung eventuell vorhandener Einsparpotenziale ist nicht möglich.

In der Gesamtbetrachtung der untersuchten Branchen ergibt sich für Nordrhein-Westfalen bei veränderter Verfahrensweise in der Industrieabwasserreinigung ein Energieeinsparpotenzial von etwa 46,0 Mio. kWh/a. Im Kern beruht dieses Potenzial auf einem reduzierten Belüftungsenergiebedarf durch den vermehrten Einsatz anaerober Vorbehandlungsverfahren. Eine zusätzlich mögliche Energieerzeugung durch die Verstromung der bei den anaeroben Abbauprozessen anfallenden Biogasmenge lässt sich ungefähr auf 48,3 Mio. kWh/a abschätzen. In Summe ergibt sich somit ein Energieeinsparpotenzial für die untersuchten Branchen von ca. 94,4 Mio. kWh/a. Dies entspricht einer möglichen CO₂-Emissionseinsparung von etwa 54,3 Mio. kg CO₂/a.

Um die branchenspezifisch ermittelten Energieeinspar- bzw. -optimierungspotenziale einfach vergleichen und bewerten zu können, ist ein Bezug zu überschlägig abgeschätzten Gesamtenergiebedarfszahlen (IST-Situation) hilfreich. Soweit die verfügbare Datengrundlage eine solche Abschätzung zulässt ist diese für die jeweiligen Branchen in Bild 10 dargestellt. Für die Milchverarbeitende Industrie, die Erfrischungsgetränke- bzw. Fruchtsaftindustrie und für die Brauwirtschaft gilt hier, dass die ermittelten Energieeinsparpotenziale von etwa 5,1 Mio., 8,9 Mio. und 17,0 Mio. kWh/a einem Anteil von 55-60 % des für die Branchen abgeschätzten Gesamtenergiebedarfs für die Abwasserreinigung entsprechen. Für Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe wird angenommen, dass das ermittelte Energieeinsparpotenzial etwa 31 % des branchenweiten Energiebedarfs ausmacht. Das für die Papierindustrie bestimmte Einsparpotenzial von ca. 31,9 Mio. kWh/a macht ebenfalls in etwa 30 % des für die Branche abgeschätzten Gesamtenergiebedarfs aus.

Die in der Gesamtbetrachtung für Nordrhein-Westfalen ermittelte Energieeinsparsumme von ca. 94,4 Mio. kWh/a entspricht somit einem Anteil von ungefähr 37 % der in den zugrundeliegenden Branchen derzeit für die Industrieabwasserreinigung genutzten Energiemenge.

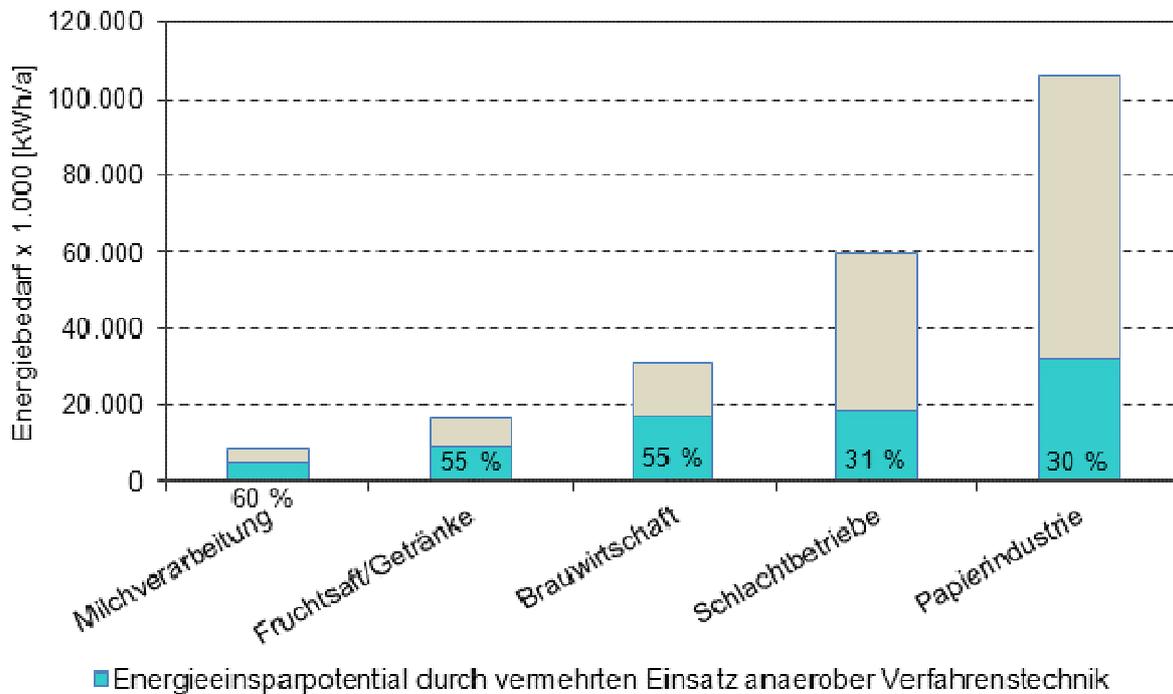


Bild 10: Branchenspezifische Darstellung des Anteils der ermittelten Energieeinsparpotenziale am jeweiligen Gesamtenergieverbrauch für die Industrieabwasserreinigung

6 Dynamische Modellierung und CO_{2e}-Bilanzierung eines Direkteinleiters und eines Indirekteinleiters

In Ergänzung zu der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ermittlung branchenspezifischer Energieeinsparpotenziale beinhaltet diese Studie eine dynamische Langzeitsimulation und CO_{2e}-Bilanzierung, die beispielhaft sowohl für einen direkt- als auch einen indirekt-einleitenden Betrieb durchgeführt wird. Unter Berücksichtigung auftretender Zulaufschwankungen werden hier interne Maßnahmen zur Verbesserung des Energieverbrauchs, eine Verbesserung der Anlagentechnik sowie der Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung an Fallbeispielen untersucht. Für den industriellen Indirekteinleiter werden hierbei auch die Auswirkungen auf den Energiebedarf einer nachfolgenden kommunalen Kläranlage berücksichtigt.

6.1 Beispiel 1 - Direkteinleiter

6.1.1 Datengrundlage und Modellaufbau

6.1.1.1 Aerobstufe

Bei der betrachteten Anlage handelt es sich um die Kläranlage einer Brauerei (Direkteinleiter), die aus folgenden Verfahrensstufen besteht: Mechanische Reinigungsstufe, zwei Misch- und Ausgleichsbecken, Belebungsbecken (vorgeschaltete Denitrifikation) mit aerober Schlammstabilisierung, Nachklärbecken und Filtration. Im Modell werden die beiden Misch- und Ausgleichsbecken, die Belebungsbecken mit vorgeschalteter Denitrifikation und die beiden parallel geschalteten Nachklärbecken berücksichtigt (Bild 11).

Für die Modellierung werden die zur Verfügung gestellten Daten der betrachteten Anlage für das Jahr 2009 verwendet. Diese Daten umfassen die Tageswassermengen und die CSB- und Nitrat-Konzentrationen im Zu- und Ablauf sowie die Feststoffkonzentrationen im Belebungsbecken und im Rücklaufschlammstrom. Die Jahresabwassermenge liegt bei etwa 600.000 m³/a, die CSB-Fracht im Mittel bei 1.000.000 kg/a. Das CSB:Nitrat-N-Verhältnis im Zulauf zur Anlage liegt relativ konstant bei 60. Zusätzlicher Stickstoff fällt in organischer Form an; dieser Anteil wird nur unregelmäßig bestimmt und liegt im Mittel bei 40 mg/l (im Vergleich dazu: Nitrat-N im Mittel ~ 50 mg/l), so dass sich das CSB-N-Verhältnis unter Berücksichtigung des organischen Stickstoff auf etwa 20 verschiebt. Der CSB im Zulauf wurde als weitestgehend leicht abbaubar eingeschätzt (85 %).

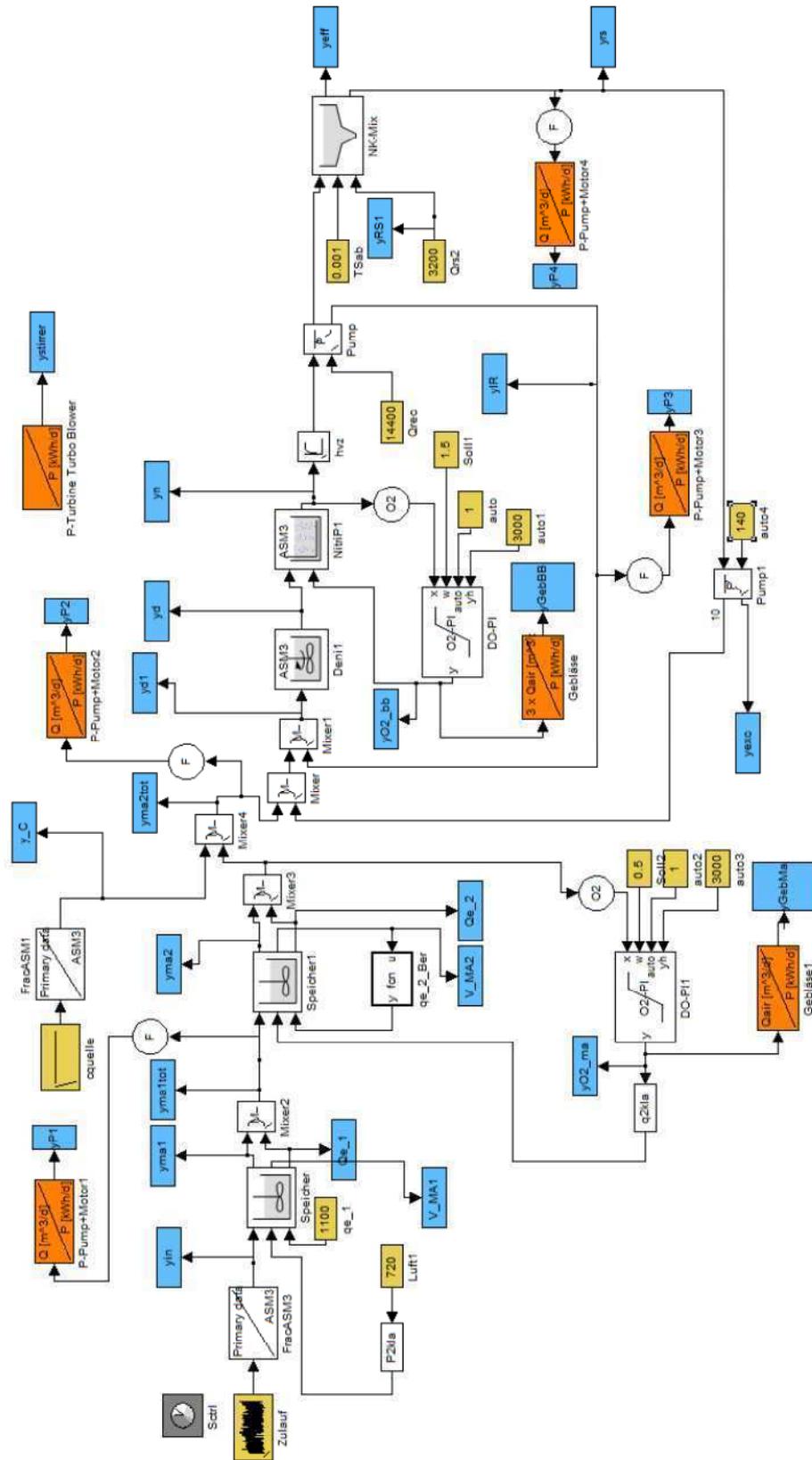


Bild 11: Modell der in Beispiel 1 betrachteten Industriekläranlage

Die weiteren Anteile wurden auf den Parameter S_I (inertes CSB, 2,0 % entsprechend der Ablaufwerte der Anlage), zu geringen Anteilen auf die Biomassefraktionen und auf die Fraktion X_S (schwer abbaubar) aufgeteilt.

Tabelle 31: Kennwerte der im Rahmen der Modellierung betrachteten Aggregate

Belüftung	
M-A-Becken I:	Kontinuierliche Gebläseleistung von 590 kWh/d
M-A-Becken II:	Regelung des Sauerstoffgehaltes auf 0,5 mg/l OC = 16 g OC/(m ³ ·m) Wirkungsgrad, Gebläse: 0,5
Nitrifikation	Regelung des Sauerstoffgehaltes auf 0,5 mg/l, OC = 16 g OC/(m ³ ·m) Wirkungsgrad, Gebläse: 0,6
Pumpen	
M-A-Becken I → M-A-Becken II	Mittlerer Energiebedarf: 9 Wh _{el} /(m ³ ·m)
M-A-Becken II → Belebungsstufe	Mittlerer Energiebedarf: 9 Wh _{el} /(m ³ ·m)
Interner Recyclestrom	Mittlerer Energiebedarf: 5 Wh _{el} /(m ³ ·m)
Rücklaufschlammstrom	Mittlerer Energiebedarf: 5 Wh _{el} /(m ³ ·m)
Nicht berücksichtigt	Die Überschussschlammpumpe ist aufgrund der geringen Mengen vernachlässigbar
Rührwerke	
M-A-Becken 1	Leistungsdichte: 6 W/m ³
M-A-Becken 2	Leistungsdichte: 1,3 W/m ³
Denitrifikation	Leistungsdichte: 4,4 W/m ³

Darüber hinaus liegen Daten über den Energieverbrauch der Kläranlage vor (Wochenwerte). Eine Auswertung der einzelnen Aggregate der Kläranlage zeigt, dass die Belebungsstufe (inkl. Misch- und Ausgleichsbecken und Nachklärung) etwa 73 % des gesamten Energieverbrauchs der Abwasserreinigungsanlage ausmacht, Hauptverbraucher sind die Belüftungsaggregate mit einem Anteil von knapp 80 % am Verbrauch der Belebungsstufe. Die verbleibenden 27 % des Gesamtenergieverbrauchs verteilen sich auf Vor-, Nach- und Schlammbehandlung, wobei ein nachgeschalteter Trockenfilter den höchsten Energiebedarf hat. Die erforderlichen Kennwerte der in der Modellierung betrachteten Aggregate sind in Tabelle 31 zusammengestellt. Zur Berechnung des spezifischen Energiebedarfs wurden vorhandene Daten hinsichtlich Anschlussleistung und Betriebsstunden aus dem Jahr 2005 als

Grundlage genommen und diese mit dem Gesamtenergiebedarf der Kläranlage pro Woche für das Jahr 2009 abgeglichen.

6.1.1.2 Anaerobstufe

Für die Auslegung der Anaerobstufe wurden Werte vergleichbarer Anlagen (Behandlung von Brauereiabwasser) sowie Ergebnisse von Pilotversuchen ausgewertet. Die Bemessungsraumbelastung in den vergleichbaren Anlagen liegt im Mittel bei etwa 10 kg CSB/(m³·d); betrieben werden die Anlage in der Regel bei etwas geringeren Belastungen von im Mittel 8 kg CSB/(m³·d). Die hydraulische Belastung im Anaerobreaktor liegt im Mittel bei 0,2 m³/(m³·h). Die Angaben für die hydraulische Aufenthaltszeit in der Vorversäuerung schwanken sehr stark, im Mittel liegen die Bemessungswerte bei 14 h und die Aufenthaltszeiten während des Anlagenbetriebs bei 25 h (Bischofsberger et al., 2005). Anhand dieser Angaben wurden die Größen des Versäuerungsreaktors (V = 2.000 m³; HRT ~ 27 h) und des Methanreaktors (V = 400 m³; B_R ~ 8,75 kg CSB/(m³·d)) bestimmt.

Die Zulauffraktionierung erfolgt anhand von Daten aus detaillierten Messungen während einer Versuchsphase. Im Rahmen dieser Phase wurde zusätzlich zum homogenisierten CSB auch der gelöste CSB betrachtet, der bei etwa 80 % liegt. Im Modell erfolgt eine konstante Aufteilung des homogenisierten CSB auf den gelösten (80 %) und den partikulären (20 %). Der partikuläre CSB wird vollständig der Fraktion X_C (Composites) zugeordnet. Der gelöste wird auf die Fraktionen Essigsäure (15 %), Propionsäure (5 %), inerte CSB (2,5 % bzw. 2 % von CSB_{hom}), Einfachzucker (46,3 %), Aminosäuren (16 %) und langkettige Fettsäuren (15,2 %) aufgeteilt.

Der ermittelte Biogasertrag wurde unter Annahme eines Heizwertes von 10 kWh/m³_N und einem elektrischen Wirkungsgrad von 35 % in einen möglichen Stromertrag umgerechnet, um die Ergebnisse mit dem Energiebedarf vergleichbar zu machen.

6.1.2 Ergebnisse der Modellrechnungen für den aeroben Direktleiter

Das Schlammalter in der Belebungsstufe wird über die Überschussschlammmenge (140 m³/d) auf etwa 10-15 d bzw. 5,5-9 d (aerob) eingestellt. Zur Durchführung der Modellrechnungen wurde zunächst eine Simulation mit konstanten mittleren Zulaufbedingungen über 100 d durchgeführt, damit sich das Modell entsprechend einschwingen kann.

Der Vergleich dieser Modellrechnungen mit den Messwerten zeigt, dass das Modell die Umsatzprozesse mit ausreichender Genauigkeit abbildet. Im Belebungsbecken stellt sich im Modell ein Feststoffgehalt von 2,5 g/l ein, die Messwerte liegen im Mittel ebenfalls bei 2,5 g/l. Im Rücklaufschlamm liegt der Feststoffgehalt bei etwa 4,0 g/l (Modell) bzw. bei 4,3 g/l (Messwerte, neues Nachklärbecken) und 7,7 g/l (Messwerte, altes Nachklärbecken). Insbesondere für das alte Nachklärbecken schwanken die Messwerte sehr stark, so dass ein detaillierterer Abgleich nur mit Hilfe von zusätzlichen Messphasen möglich ist. Die Simulationsergebnisse hinsichtlich CSB- und Nitrat-N-Ablaufkonzentration zeigen ebenfalls, dass nicht sämtliche Schwankungen in den Messwerten abgebildet, aber die Größenordnung und Tendenzen im Wesentlichen erfasst werden.

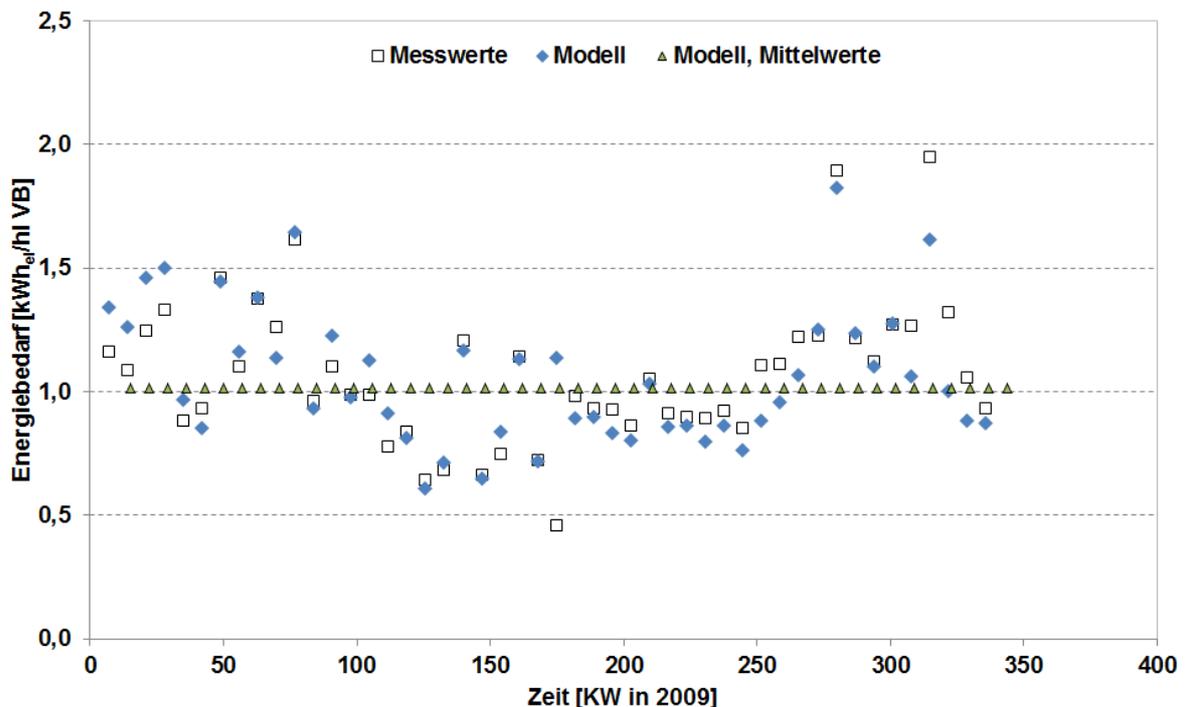


Bild 12: Elektrischer Energiebedarf der realen Anlage bezogen auf die produzierte Menge Verkaufsbier [kWh/hl VB] im Vergleich zur Simulation mit schwankenden und konstanten Zulaufwerten

Der Schwerpunkt der Modellierung wurde auf den Abgleich des Energiebedarfs gelegt. Die Belebungsstufe hat einen Anteil von etwa 75 % am gesamten Energiebedarf der Kläranlage. Die Ergebnisse der Simulation werden daher entsprechend prozentual erhöht, um den Bedarf für die restlichen Verfahrensschritte und Anlagenteile (Schlammbehandlung, Vor- und Nachbehandlung u.a. Trockenfilter, Dosierpumpe) zu berücksichtigen und einen Gesamtenergiebedarf der Kläranlage zu berechnen. Der spezifische Gesamtenergiebedarf bezogen auf die produzierte Biermenge [hl VB] für den Simula-

tionszeitraum im Vergleich zu den Messwerten ist in Bild 12 dargestellt; eine gute Korrelation zwischen Mess- und Modellwerten ist erkennbar. Bild 12 zeigt außerdem die Ergebnisse der dynamischen Simulation im Vergleich zu den Ergebnissen bei mittleren Zulaufbedingungen. Es wird deutlich, dass der Unterschied im Mittel relativ gering ist und der Energiebedarf für die dynamische Simulation im Vergleich zur Berechnung mit konstanten Werten nur geringfügig höher ist. Ein Grund hierfür sind die beiden Misch- und Ausgleichsbecken, die die Belastung der Belebungsstufe weitgehend vergleichmäßigen, so dass der dynamische Einfluss reduziert wird.

6.1.3 Variationsrechnungen zur Energieoptimierung

Mit dem Modell wurden unterschiedliche Variationsrechnungen durchgeführt, um den Energiebedarf der betrachteten Kläranlage zu optimieren. Die untersuchten Varianten basieren im Wesentlichen auf praktischen Erfahrungen im kommunalen Bereich (Thöle et al., 2004). Nach jeder Modellrechnung wurden zunächst die Ablaufkonzentrationen hinsichtlich CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$ und N_{ges} betrachtet. In keiner Simulationsrechnung konnte eine wesentliche Änderung dieser Werte ($\sim 40 \text{ mg CSB/l}$, $\ll 10 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ und $< 10 \text{ mg N}_{\text{ges/l}}$) oder ein Überschreiten der Grenzwerte (110 mg CSB/l , $10 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$, $18 \text{ mg N}_{\text{ges/l}}$) festgestellt werden. Die durchgeführten Variationsrechnungen haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

- In den ersten beiden Variationsrechnungen wurde der vorgegebene **Sauerstoffgehalt** in der Nitrifikation reduziert. Die Reduzierung des Soll-Gehaltes im Nitrifikationsbecken von 1,5 auf 1,0 $\text{mg O}_2/\text{l}$ führt zu einem um $\sim 2 \%$ niedrigeren Jahresenergiebedarf.
- Einen größeren Einfluss haben Verbesserungen in den **Belüftungssystemen**. Die Veränderung des spezifischen Sauerstoffeintrags von 16 auf 20 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ führt zu einer Reduzierung des Jahresenergiebedarfs um $\sim 14 \%$ (Bild 13). Diese Erhöhung entspricht einer Verbesserung des Sauerstoffertrags von 1,9 auf 2,4 $\text{kg O}_2/\text{kWh}$, der auch in der Praxis durch den Einsatz von neueren Belüftungssystemen gewährleistet werden kann (vgl. Wagner, 2001).
- Für die Optimierung des Energiebedarfs der **Rührwerke** wurde die Leistungsdichte im M-A-Becken 1 und in der Denitrifikation auf 2 W/m^3 reduziert. Diese Änderung führt zu einer Verbesserung des Jahresenergiebedarfs von 5,5 % (Bild 14).

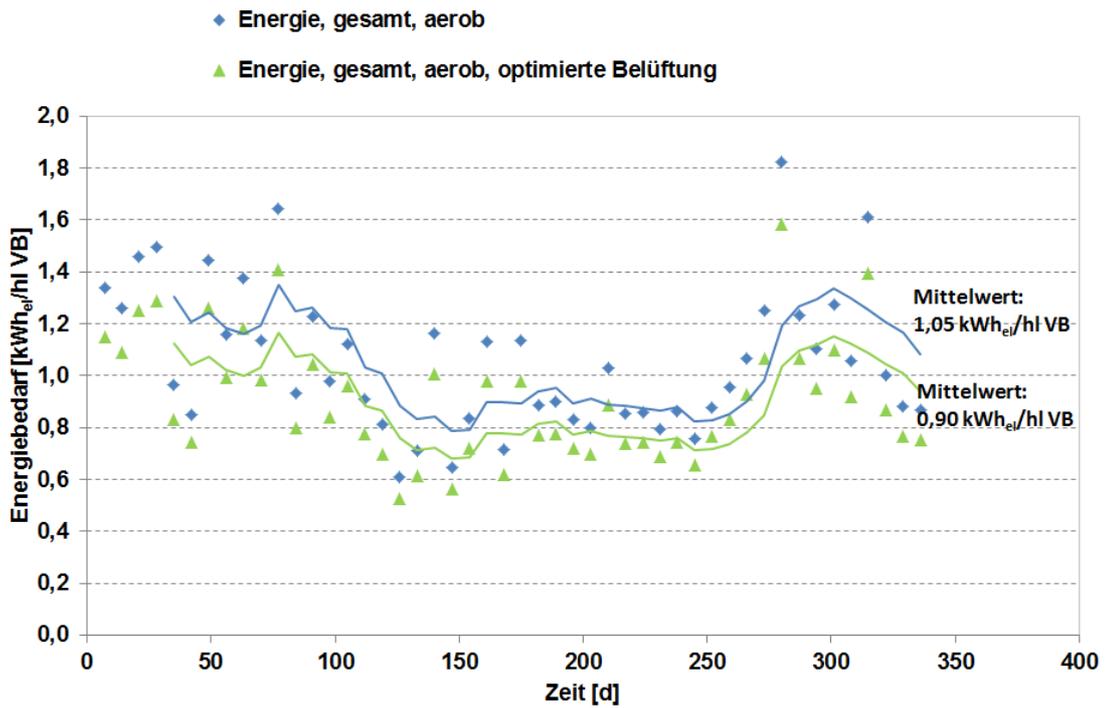


Bild 13: Energiebedarf [kWh_{ei}/hl VB] über den Untersuchungszeitraum bei optimierter Belüftung im Vergleich zur Standardvariante

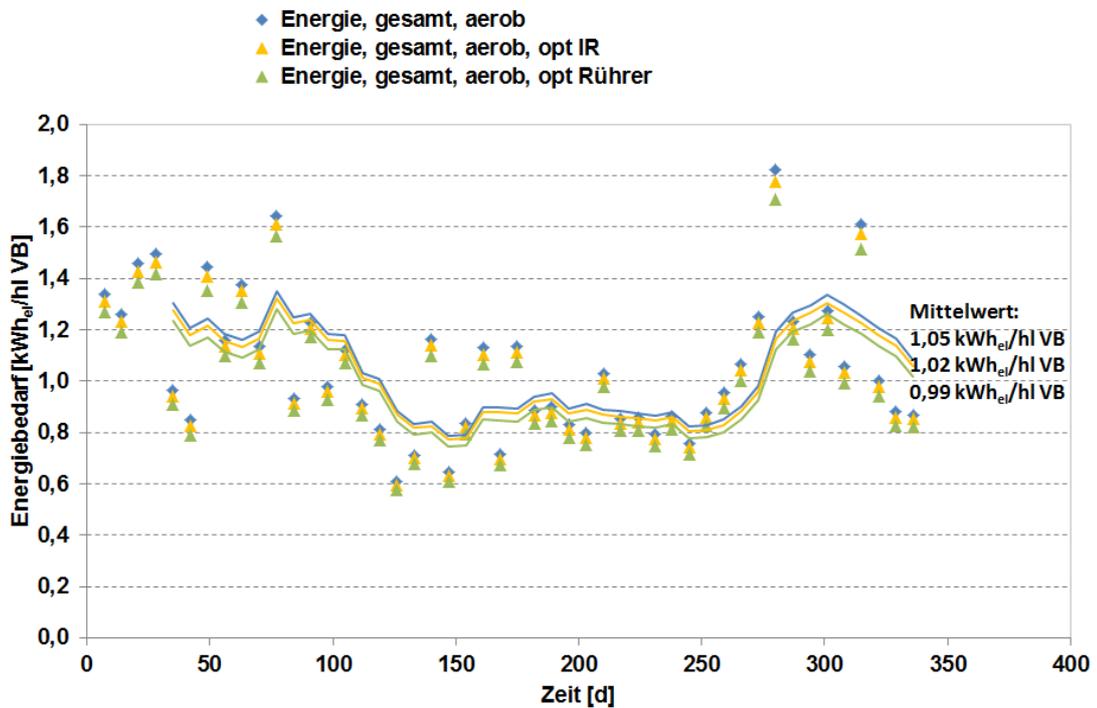


Bild 14: Energiebedarf [kWh_{ei}/hl VB] über den Untersuchungszeitraum bei reduziertem internen Recycle und reduziertem Energiebedarf der Rührer im Vergleich zur Standardvariante

- Ein weiterer Vorschlag zur Reduzierung des Energiebedarfs ist die **Anpassung des Rücklaufschlammstroms** an die Zulaufwassermenge. Aufgrund des geringen Volumenstroms ist diese Einsparung jedoch vernachlässigbar. Auch eine Verbesserung des Wirkungsgrads der beiden ersten Pumpen (MA1 → MA2, MA2 → BB) führt insgesamt nur zu einer geringen Verbesserung des Energiebedarfs um etwa 2 %.
- Aufgrund des in dieser Anlage sehr großen **internen Recycle** ($Q_{IR} = 14.400 \text{ m}^3/\text{d}$) besteht auch hier ein Einsparpotenzial, der spezifische Energiebedarf dieser Pumpe ist jedoch vergleichsweise niedrig. Die Reduzierung des Stroms auf $Q_{IR} = 4.500 \text{ m}^3/\text{d}$ ($\sim 3 \times Q_{d,Zu}$) führt zu einer Verbesserung im Gesamtenergiebedarf um 2 % (Bild 14).
- In einer weiteren Variante wurde der **Einfluss des Schlammalters** untersucht: Zunächst wurde ein Schlammalter von 7 d eingestellt, um auch eine aerobe Schlammstabilisierung gewährleisten zu können. Die Einsparungen sind vergleichsweise gering und liegen bei 1,5 %. In einer zweiten Variante wurde das Schlammalter auf 2 d reduziert. Diese Reduzierung führt zu einem geringeren Energieverbrauch im Vergleich mit der Standardvariante von 8 %. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Schlamm nicht mehr stabilisiert wird und z.B. eine Faulung installiert werden müsste, so dass erhebliche Investitionen notwendig wären, aber auch Energie in Form von Biogas gewonnen werden könnte.

6.1.4 Einbindung einer Anaerobstufe

Vor Durchführung der Simulationsrechnungen mit dem Modell der Anaerobstufe und dem Modell der Gesamtanlage wurde zunächst jeweils eine Simulation mit konstanten mittleren Zulaufbedingungen über 1.000 d durchgeführt, damit sich das Modell einschwingen kann. In Bild 15 ist der potenzielle elektrische Energieertrag der Anaerobstufe aus Modellrechnungen mit schwankenden und konstanten Zulaufbedingungen dargestellt. Es zeigt sich, dass bei konstanten Zulaufbedingungen der Biogas- bzw. der Energieertrag etwas überschätzt wird.

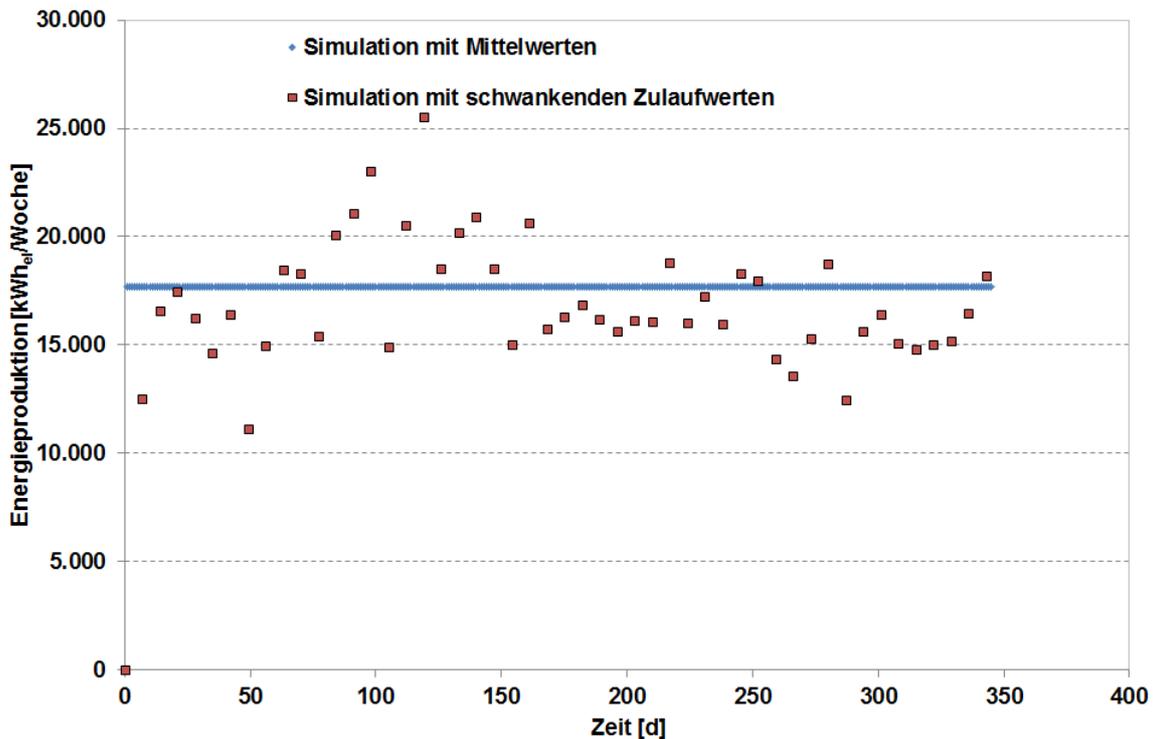


Bild 15: Energieproduktion berechnet aus der Biogasproduktion für die Simulation mit Mittelwerten und die Simulation mit schwankenden Zulaufwerten

Für die Abbildung der Gesamtanlage bestehend aus Anaerobstufe mit aerober Nachbehandlung wurde ein vorhandener ADM1-ASM1-Konverterblock für die Übergabe der Parameter des ADM1 an das ASM3 entsprechend angepasst, so dass die CSB- und die N-Bilanz geschlossen ist. Die Ammoniumkonzentration im Zulauf der Belebungsstufe wurde durch die Reduzierung des Parameters i_{NSS} (N-Gehalt der leichtabbaubaren Stoffe) von 0,3 auf 0,2 g N/g CSB an die Konzentration im Ablauf des Anaerobreaktors angepasst.

Die Ablaufkonzentrationen wurden nach jeder Berechnung überprüft, ein Anstieg der Konzentration konnte nicht beobachtet werden, die Grenzwerte wurden in jedem Fall eingehalten. In der Aerobstufe war keine zusätzliche Kohlenstoffdosierung notwendig, da noch genügend CSB im Zulauf dieser Stufe vorhanden ist und die Ammoniumkonzentrationen vergleichsweise gering sind. Die Energiebilanz der Variante ist in Bild 16 dargestellt. Es zeigt sich, dass die industrielle Kläranlage mit Anaerobstufe energieautark betrieben und eine geringe Mengen Energie gewonnen werden kann. Die Einsparung gegenüber der vorherigen Stufe liegt insgesamt bei etwa 1 kWh_e/hl VB.

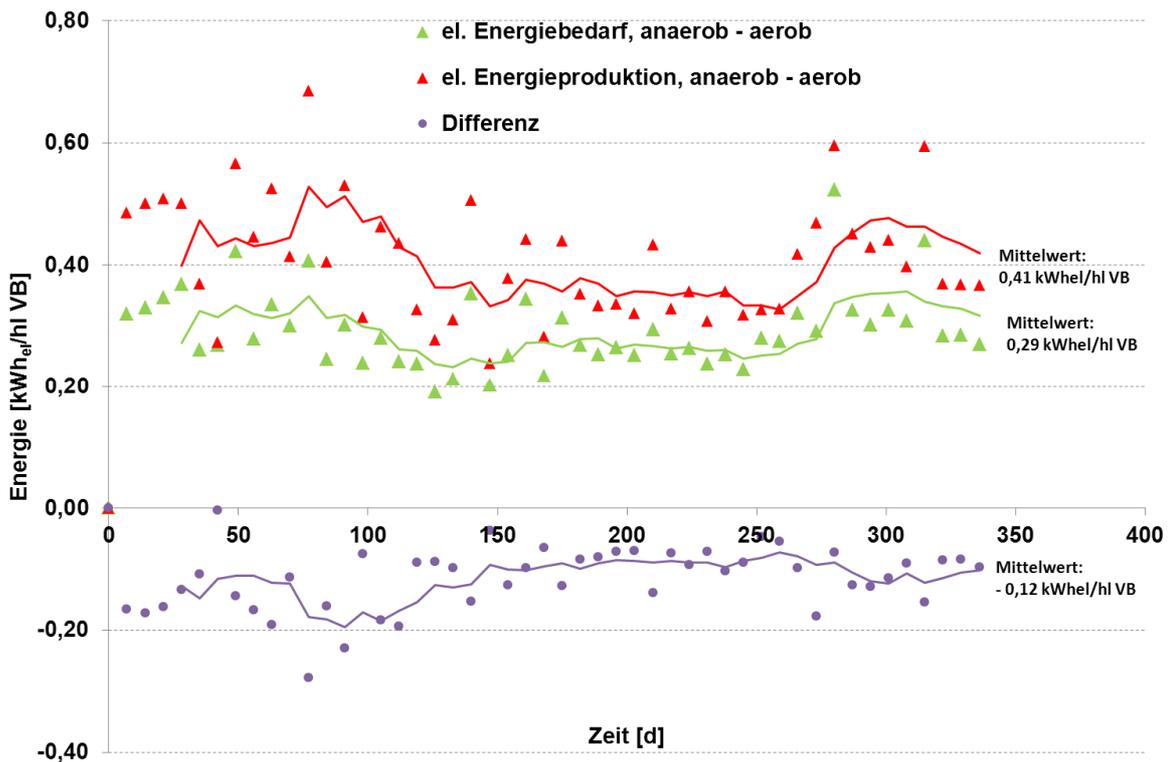


Bild 16: Elektrischer Energiebedarf und elektrische Energieproduktion der Gesamtanlage (Anaerobe Vorbehandlung mit nachgeschalteter Belebungsstufe)

6.2 Beispiel 2 - Indirekteinleiter

6.2.1 Datengrundlage

Im zweiten Berechnungsbeispiel werden ein industrieller Indirekteinleiter und die Auswirkungen des Einleiters auf den Energiebedarf einer kommunalen Anlage untersucht. Um den Modellrechnungen typische und vergleichbare Energiezahlen einer kommunalen Anlage zu Grunde zu legen, wurden die Kennwerte der energetisch optimierten Modellanlage mit 100.000 EW aus dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ (MURL, 1999) verwendet. Die Kennwerte dieser Anlage sind mit einem Schmutzwasseranfall von 140 l/EW/d und einem Regen- und Fremdwasseranfall von 105 l/EW/d angegeben; die Zulaufkonzentrationen wurden für KN und CSB entsprechend A 131 angesetzt. Das Belebungsbecken hat ein Gesamtvolumen von 25.000 m³.

Für die Simulationsrechnungen hinsichtlich des Energiebedarfs wurde im Wesentlichen die Belebungsstufe (vorgesaltete Denitrifikation) mit den folgenden Energieverbrauchern berücksichtigt:

- Rücklaufschlamm-Pumpwerk:
24.000 m³ RS/d, Förderhöhe: 1,5 m, Nutzungsgrad Pumpe: 0,60
- Interne Rezirkulation:
73.500 m³/d, Förderhöhe: 0,5 m, Nutzungsgrad Pumpe: 0,70
- Überschussschlamm-Pumpwerk:
616 m³/d, Förderhöhe: 4,0 m, Nutzungsgrad Pumpe: 0,60
- Umwälzung, Denitrifikation: 1,5 W/m³
- Gebläse, Nitrifikation:
14°C, Soll: 1,5 mg O₂/l, α = 0,69, OC = 21 g/m³/m, Beckentiefe: 5,0 m

Der Energieertrag aus der anaeroben Primär- und Überschussschlammproduktion wurde anhand der anfallenden Schlammengen mit Hilfe der folgenden mittleren Gaserträgen gerechnet: Primärschlamm: 0,55 m³_N/kg oTR, Überschussschlamm 0,275 m³_N/kg oTR. Der Methananteil im Biogas wurde mit 60 %, der Methan-Heizwert mit 10 kWh/m³ und der elektrische Wirkungsgrad mit 35 % angenommen.

Bei dem Indirekteinleiter handelt es sich ebenfalls um eine Brauerei mit einem CSB/N-Verhältnis >> 20; als Vorbehandlung erfolgt nur die Vergleichmäßigung in einem gering belüfteten M-A-Becken. Der Anteil des industriellen Einleiters an der Gesamtabwassermenge und -fracht sind in Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 32: Vergleich von Frachten und Mengen im Zulauf zur Belegung der kommunalen Anlage

	Kommunale Anlage	Industrieanlage	
	Zulauf BB	Zulauf BB	Anteil Gesamtfracht/-menge [%]
Q [m ³ /d]	24.000	~ 1.750	~ 7
B _{d,CSB} [kg/d]	9.000	~ 2.800	~ 24
B _{d,KN} [kg/d]	1.000	~ 73	~ 7

6.2.2 Ergebnisse der Modellrechnungen

Für die ersten Berechnungen wurde eine gleichmäßige Belastung der kommunalen Kläranlage angenommen und der Energiebedarf unter konstanten Bedingungen bei unterschiedlichen Lastfällen bestimmt. Die Grenzwerte der kommunalen Kläranlage sind für jeden Lastfall eingehalten worden.

In Bild 17 ist der Energiebedarf und die -produktion aus der Faulschlammstabilisierung für die kommunale Anlage mit und ohne Indirekteinleiter bezogen auf den Zulaufvolumenstrom zusammengefasst. Der Energiebedarf der Belebungsstufe der kommunalen Anlage liegt bei knapp 0,2 kWh/m³; diese macht etwa 80 % des Gesamtenergiebedarfs aus, der entsprechend bei knapp 0,25 kWh/m³ liegt. Der Energiebedarf der Belebungsstufe inkl. industriellem Indirekteinleiter liegt bei knapp 0,22 kWh/d; der Mehrbedarf auf der kommunalen Anlage beruht auf einem höheren Bedarf an Belüftungsenergie und liegt bei ca. 10 %.

Die höhere Inputfracht führt auch zu einem höheren Überschussschlammanfall und damit zu einer höheren Energieproduktion von ca. 0,09 kWh_{el}/m³. Neben dem Energiebedarf auf der kommunalen Kläranlage wird zusätzliche Energie bei der Vorbehandlung beim Industriebetrieb benötigt, die bei knapp 0,1 kWh_{el}/d liegt.

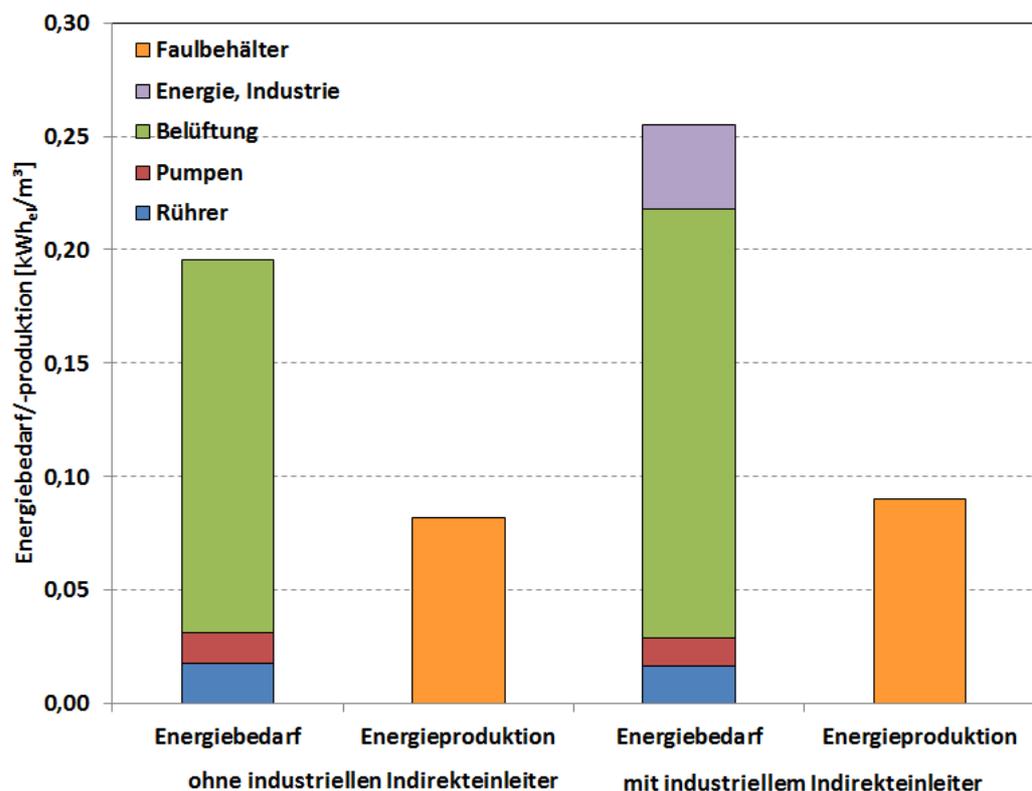


Bild 17: Energiebedarf der Belebungsstufe einer kommunalen Kläranlage mit und ohne Indirekteinleiter bezogen auf Q_{Zu}

Wird der Mehrbedarf an Energie (kommunalen Anlage und Bedarf zur Vorbehandlung) allein auf den Indirekteinleiter bezogen, berechnet sich dieser zu etwa 0,3 kWh/hl VB. Die im Vergleich zum Direkteinleiter deutlich niedrigeren Werte lassen sich auf den Wegfall eines zweiten Misch- und Ausgleichbeckens, eine optimierte Aggregate (Pumpen, Rührer, Gebläse) sowie auf die

anaerobe Schlammstabilisierung (im Vergleich dazu beim Direktreinleiter: aerobe Schlammstabilisierung). Zudem ist der Energiebedarf nur für die Belebungsstufe und nicht für die Gesamtanlage bestimmt worden.

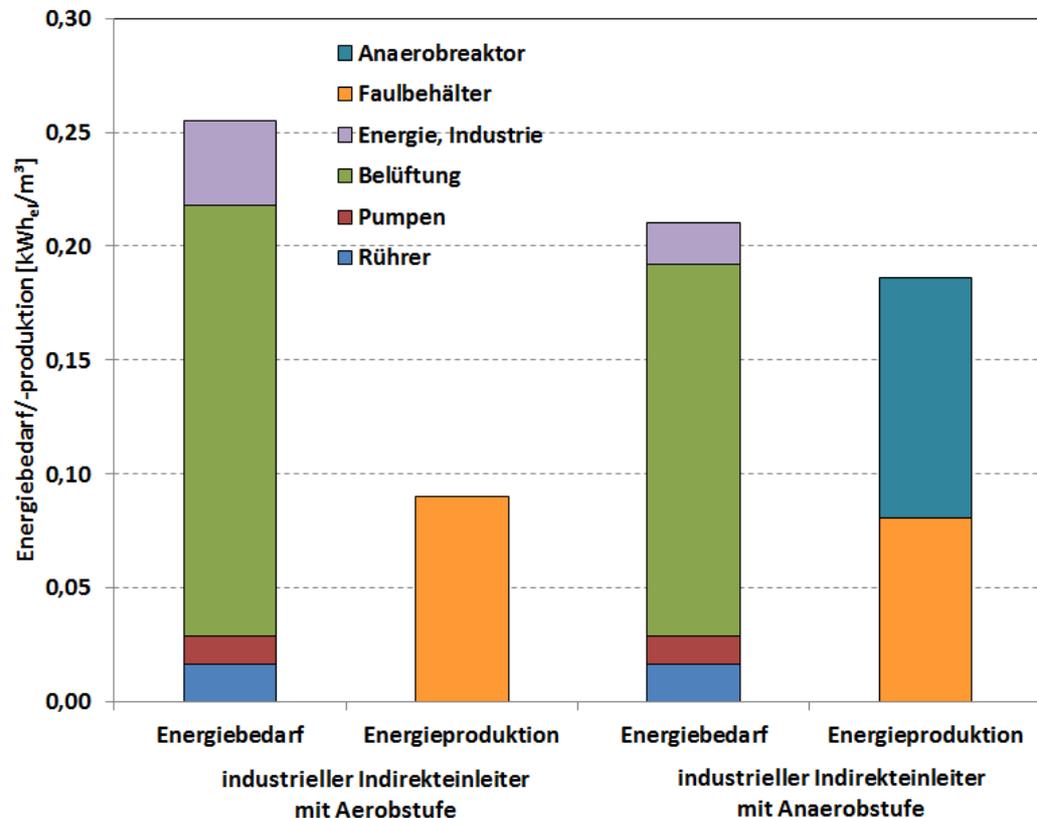


Bild 18: Energiebedarf der Belebungsstufe einer kommunalen Kläranlage mit Indirekteinleiter ohne wesentliche Vorbehandlungsstufe (belüftetes M-A-Becken) und mit Indirekteinleiter nach Anaerobstufe

In Bild 18 ist der Energiebedarf der Belebungsstufe der kommunalen Kläranlage für einen Indirekteinleiter mit aerober Vorbehandlung (belüftetes Misch- und Ausgleichsbecken) und anaerober Vorbehandlung dargestellt. Der Energiebedarf in der Belebungsanlage reduziert sich beim Einsatz einer Anaerobstufe auf etwa 0,19 kWh/m³. Die Biogasproduktion auf der kommunalen Kläranlage ist ebenfalls etwas geringer, es werden jedoch erhebliche Mengen an Energie im Anaerobreaktor beim Industrieunternehmen produziert. Bezogen auf die Indirekteinleiter werden nur noch ein Drittel der Energie für die aerobe Mitbehandlung benötigt (0,11 kWh/hl VB) und zusätzlich 0,38 kWh/hL VB produziert; das Energiepotenzial der Verfahrensumstellung liegt daher insgesamt bei etwa 0,5 - 0,6 kWh/hl VB.

6.2.3 Variationsrechnungen

In weiteren Berechnungen ist der Anteil des industriellen Indirekteinleiters am Gesamtzulaufvolumenstrom für zwei unterschiedliche Abwasserkonzentrationen variiert worden. Im ersten Fall liegt das Verhältnis der CSB-Konzentrationen von Industrieabwasser und Kommunalabwasser bei 4:1, im zweiten Fall bei 2:1. Energiebedarf und –ertrag wurden sowohl bei aerober Vorbehandlung (belüftetes Misch- und Ausgleichsbecken) und bei anaerober Vorbehandlung berechnet. Der Nettoenergiebedarf bzw. -ertrag ist in Bild 19 dargestellt. Bei einem Verhältnis der CSB-Konzentrationen von 4:1 kann eine kommunale Kläranlage schon bei einem Indirekteinleiteranteil von etwa 15 % beim Einsatz einer anaeroben Vorbehandlung energieautark betrieben werden, bei einem Verhältnis von 2:1 ist dies ab einem Indirekteinleiteranteil von ca. 75 % möglich.

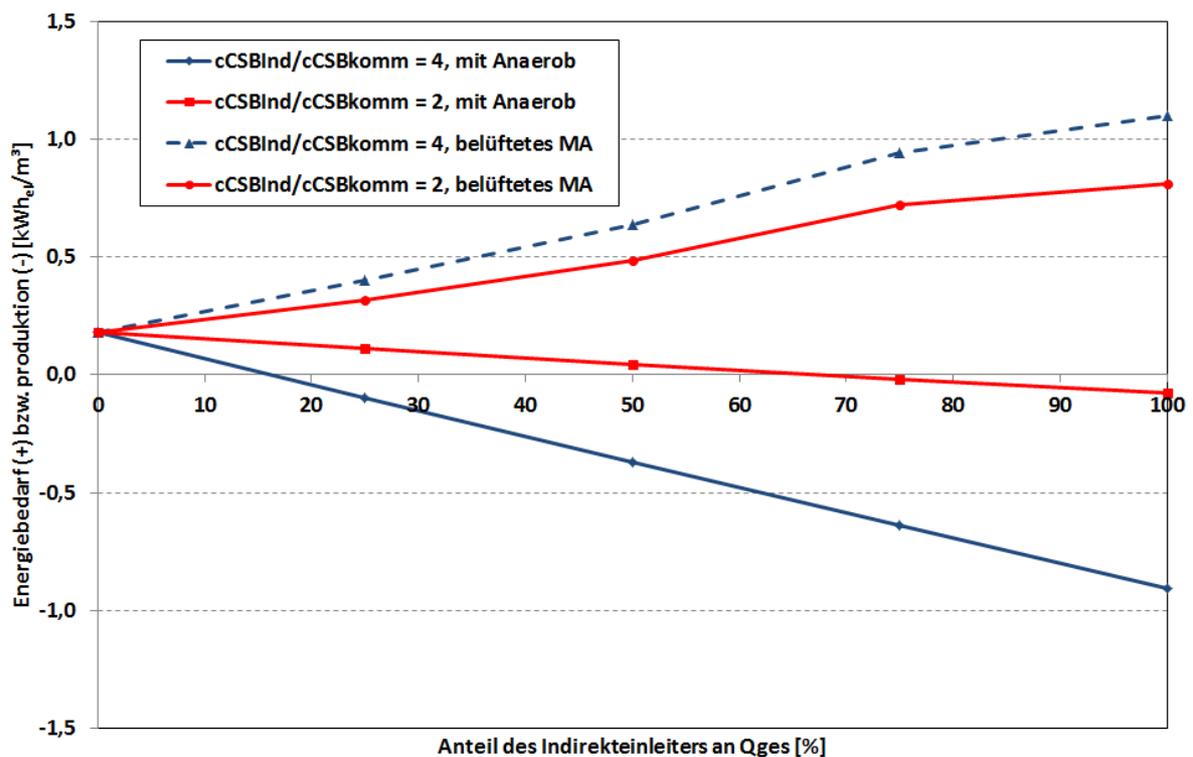


Bild 19: Energiebedarf/-produktion bei Variation des Indirekteinleiter-Anteils

Die Reduzierung der CSB-Zulaufmengen durch eine Anaerobstufe kann dazu führen, dass für die Denitrifikation nur unzureichende Mengen an leicht abbaubaren Kohlenstoffen zur Verfügung stehen und die Nitrat-Ablaufwerte ansteigen. Für das in Abschnitt 6.2.3 betrachtete Beispiel mit Anaerobstufe stehen aufgrund des hohen CSB/N-Verhältnisses auch nach dem Methanreaktor noch ausreichende Mengen an Kohlenstoff zur Verfügung – das CSB/N-Verhältnis im Zulauf zur Belebungsstufe liegt bei etwa 20.

In anderen Industriebranchen können jedoch weitaus höhere KN-Konzentrationen im Abwasser vorliegen und damit schlechtere CSB/N-Verhältnisse auftreten. In zwei Variationsrechnungen wurde daher die KN-Konzentration im Zulauf der Anaerobstufe verdoppelt bzw. vervierfacht und damit das CSB/N-Verhältnis entsprechend reduziert. Energiebedarf und -produktion dieser Varianten verändern sich nur geringfügig (Bild 20) – aufgrund der höheren Stickstofffracht werden 2 bzw. 6 % mehr Energie benötigt, die Energieproduktion reduziert sich um knapp 0,4 bzw. 1 %.

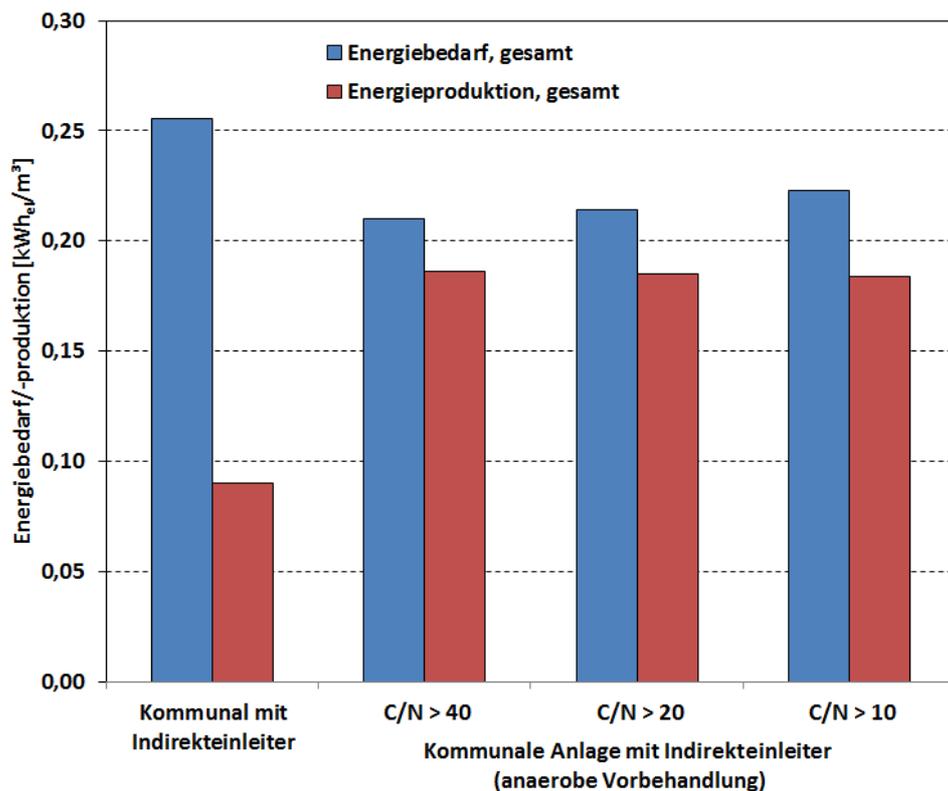


Bild 20: Energiebedarf und -produktion einer kommunalen Anlage mit Indirekteinleiter (24 % der CSB-Fracht) bei unterschiedlichen C/N-Verhältnissen im Industrieabwasser (Zulauf der Anaerobstufe)

Die Simulationsergebnisse zeigen bei konstanten Zulaufbedingungen keine Verschlechterung der Ablaufwerte, da im Gesamtzulauf der Kläranlage für beide Varianten das CSB/N-Verhältnis bei > 5 liegt. Wird jedoch beim Indirekteinleiter eine Wochenganglinie gefahren, können im Ablauf der kommunalen Kläranlage bis 10 mg NO₃-N/l und ~ 3,14 mg NH₄-N/l auftreten und damit der Grenzwert für N_{ges} fast erreicht oder in Einzelfällen überschritten werden. Eine weitere Verschlechterung des CSB/N-Verhältnis oder ein höherer Industrieanteil in der kommunalen Kläranlage würde zu einem Übertreten der Grenzwerte führen, wenn nicht entsprechende Gegenmaßnahmen (Kohlenstoffdosierung, Bypass-Führung) durchgeführt werden.

Weitere Berechnungen wurden mit Zulaufdaten mit einem stärkeren Jahresgang durchgeführt. Die Zulaufmengen wurden für einen Zeitraum von etwa 100 d verdoppelt, im restlichen Zeitraum reduziert. Der Jahresmittelwert für den Zulauf-Volumenstrom blieb gleich. Die Ergebnisse zeigen, dass bei hoher Belastung sowohl Energieproduktion und –bedarf als auch die Ablaufwerte ansteigen, jedoch auch bei höheren Stickstoffkonzentrationen für diesen Lastfall keine Grenzwertüberschreitungen auftreten. Der mittlere Energiebedarf verändert gegenüber dem Lastfall mit konstanten Bedingungen ändert sich nur geringfügig, der mittlere Biogasertrag reduzierte sich aufgrund der Schwankungen um ca. 15 %.

6.3 Bilanzierung der CO₂-Emissionen

Zur Bilanzierung der CO₂-Emissionen wurde im Rahmen des Projektes für unterschiedliche Varianten der beiden Beispiele Modelle mit der Software UMBERTO aufgebaut. In Bild 21 ist beispielhaft das Modell der Industriekläranlage zur Behandlung von Abwasser einer Brauerei (Direkteinleiter) dargestellt. Die Belebung wurde im Fließschema vereinfachend mit nachgeschalteter Denitrifikation dargestellt, wobei berücksichtigt wurde, dass genügend leicht abbaubarer CSB in der Denitrifikation zur Verfügung steht.

Um Veränderungen der Abwasserqualität z.B. durch das Vorschalten einer Anaerobstufe mit dem Modell erfassen zu können, wurden den einzelnen Blöcken Funktionen hinterlegt und für den jeweiligen Abbauprozess ein spezifischer Energiebedarf berechnet. Die Grundlagen für das Beispiel 1 (Direkteinleiter) und Beispiel 2 (Indirekteinleiter) entsprechen weitestgehend den Annahmen der Berechnungen mit dem dynamischen Modell und sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 zusammengefasst. Die Kennwerte für die Anaerobstufe beider Beispiele sind in Tabelle 35 zusammengefasst. Insgesamt wurden für die folgenden Varianten Energiebilanzen erstellt und CO₂-Emissionen berechnet:

- 1 a) Direkteinleiter mit aerober Schlammstabilisierung
 - 1 b) Direkteinleiter mit Anaerobstufe und nachgeschalteter Aerobstufen inkl. aerober Schlammstabilisierung
 - 2 a) optimierte kommunale Kläranlage (nach MURL, 1999)
 - 2 b) optimierte kommunale Kläranlage mit industriellem Indirekteinleiter mit belüftetem Misch- und Ausgleichsbecken auf dem Betriebsgelände
 - 2 c) optimierte kommunale Kläranlage mit industriellem Indirekteinleiter mit Anaerobstufe auf dem Betriebsgelände
-

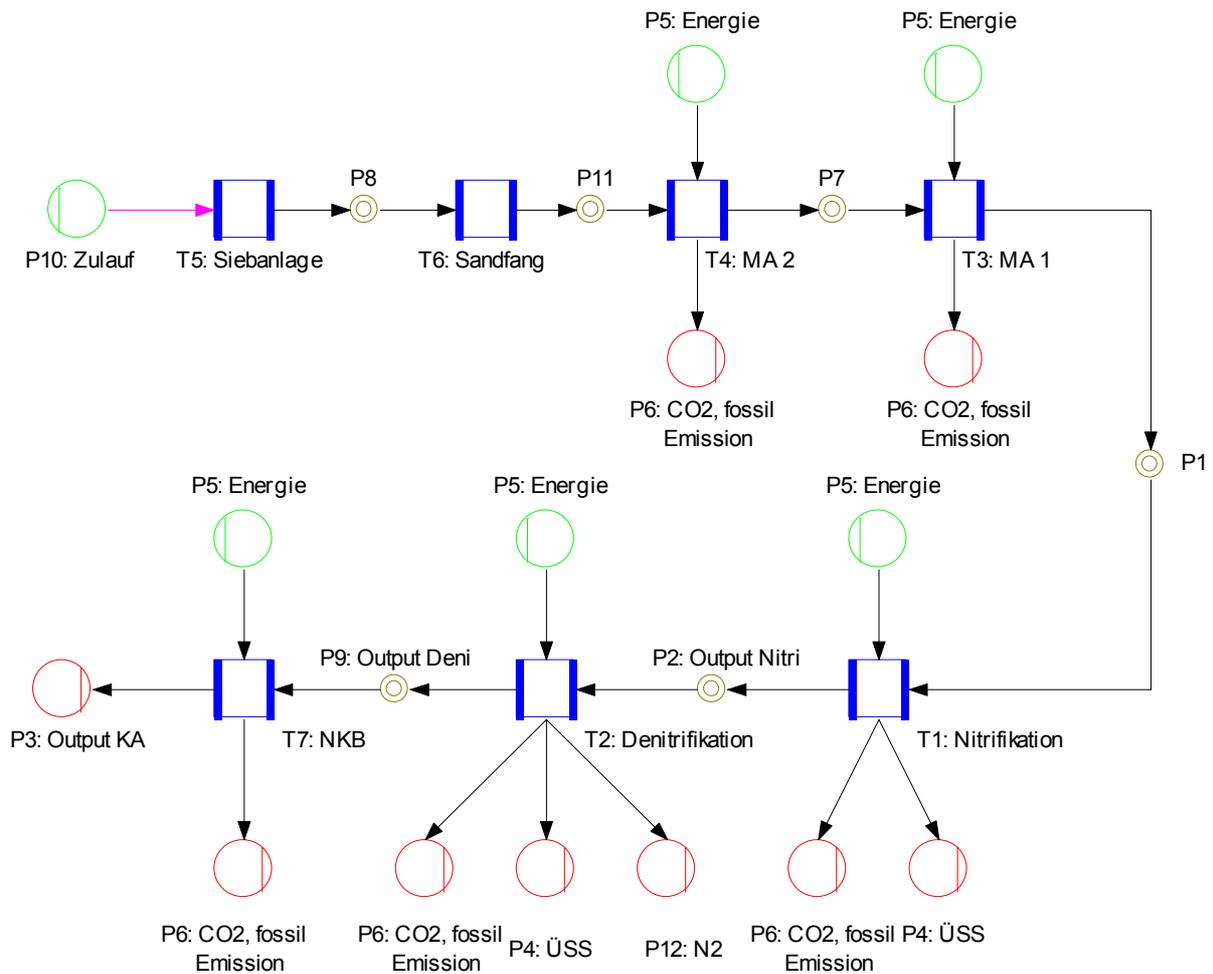


Bild 21: UMBERTO-Fließbild des aeroben Direkteinleiters (Brauerei)

Zur Bilanzierung von Energiebedarf und -produktion werden wie bereits im Rahmen der dynamischen Modellierung sämtliche Energiemengen in elektrische Energie umgerechnet, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Es wird angenommen, dass eine ggf. erforderliche Aufheizung des Abwassers über die im BHKW anfallende überschüssige Wärme gedeckt werden kann. Zur Berechnung der CO₂-Emissionen erfolgte die Umrechnung der Energiemengen entsprechend des in NRW vorliegenden Energiemix mit 0,681 kg CO₂/kWh_{el} (RWE, 2009). Dieser Wert liegt aufgrund des höheren Anteils an Kohlekraftwerken höher als Wert für Deutschland (0,575 kg CO₂/kWh_{el}); die Emissionen können direkt umgerechnet werden.

Tabelle 33: Kennwerte für Beispiel 1

Verfahrensstufe	Umsatz	Energieverbrauch
Misch- und Ausgleichsbecken 1	CSB-Abbau: 21 %	Pumpe: 0,01 kWh/(m ³ ·m) Rührwerk: 0,12 kWh/(m ³ ·d) Gebläse: 2 kg O ₂ /kWh
Misch- und Ausgleichsbecken 2	CSB-Abbau: 57 %	
	Zulauf zur BB: Org. N vollständig zu NH ₄ -N umgewandelt NO ₃ -N im Zulauf vollständig zu ~ 80 % zu N ₂ umgesetzt (Ablaufgrenzwerte eingehalten)	
Belebung	Vollständiger CSB-Umsatz in Nitrifikation abzgl. CSB-Menge, die für Denitrifikation zur Verfügung stehen muss Vollständige Nitrifikation des Ammoniums 90 % des Ammoniums wird denitrifiziert	Pumpe: IR: 0,0075 kWh/(m ³ ·m) RS: 0,0075 kWh/(m ³ ·m) ÜSS: 0,0075 kWh/(m ³ ·m) Gebläse: 1,4 kg O ₂ /kWh Rührwerk, Denitrifikation: 0,12 kWh/(m ³ ·d)

Tabelle 34: Kennwerte für Beispiel 2

Verfahrensstufe	Umsatz	Energieverbrauch
Vorklärbecken	--	Räumer: 0,5 kW/Becken PS: 0,0027 kWh/(m ³ ·m)
Belebung	Vollständiger CSB-Umsatz in Nitrifikation abzgl. CSB-Menge, die für Denitrifikation zur Verfügung stehen muss Vollständige Nitrifikation des Ammoniums NO ₃ -N im Zulauf vollständig zu ~ 80 % zu N ₂ umgesetzt (Ablaufgrenzwerte eingehalten)	Pumpe: IR: 0,0027 kWh/(m ³ ·m) RS: 0,0027 kWh/(m ³ ·m) NKB: 0,0027 kWh/(m ³ ·m) Gebläse: 2,6 kg O ₂ /kWh Rührwerk, Denitrifikation: 1,5 W/m ³ NKB, Räumer: 0,6 kW Anschlussleistung
Faulbehälter	TR = 40 g/l FS oTR = 66,7 % Gasmenge = 0,3 m ³ /kg oTR Methanqualität = 60% H _{u,CH4} = 10 kWh/m ³ Heizwert, Methan: 10 kWh/m ³ Wirkungsgrad, BHKW: η _{elek} = 35 %	Pumpe: 0,0075 kWh/(m ³ ·m)

Tabelle 35: Kennwerte der Anaerobstufen für beide Beispiele

Umsatz	80 % CSB Abbau N-Elimination vernachlässigt
Energiebedarf	Zulauf, Versäuerung: 0,0075 kWh/(m ³ ·m) Zulauf, Methanreaktor: 0,0045 kWh/(m ³ ·m) Rührwerk, Versäuerung: 6 W/m ³
Energieproduktion	H _{u,CH₄} = 10 kWh/m ³ η _{elek} = 35 % Methanproduktion: 320 l/kg CSB _{ei}

Der Energiebedarf bzw. die Energieproduktion für Beispiel 1 ist in Bild 22 als Sankey-Diagramm bezogen auf hl VB (Verkaufsbier) dargestellt. Die berechneten Energiemengen stimmen mit den im Rahmen der dynamischen Modellierung berechneten Mittelwerten weitestgehend überein. Aufgrund der besseren Sauerstoffausnutzung in den Misch- und Ausgleichsbecken ist der Gesamtenergiebedarf des Direktinleiters mit aerober Schlammstabilisierung (1a) niedriger als bei der dynamischen Modellierung. Die Sankey-Diagramme verdeutlichen den großen Anteil der Belüftung am Gesamtenergiebedarf. Der größte Energieverbraucher ist mit ca. 0,23 kWh/hl VB das Gebläse des zweiten belüfteten Misch- und Ausgleichsbeckens. Das Sankey-Diagramm für den Direktinleiter mit Anaerobstufe zeigt das große Energiepotenzial dieser Variante, der Gesamtenergieverbrauch ist deutlich reduziert. Der größte Energieverbraucher bei der Variante mit Anaerobstufe ist das Belebungsbecken mit 0,17 kWh/hl VB, die sich auf Pumpenergie (inkl. Rezirkulations-, Rücklaufschlamm- und Überschussschlammpumpe) und Belüftungsenergie nahezu gleichmäßig verteilt.

Die Verteilung der CO₂-Emissionen sieht ähnlich aus und ist für dieses Beispiel entsprechend in Bild 23 dargestellt. Die Emissionen sind pro m³ Zulaufvolumenstrom berechnet, damit ein direkter Vergleich zu Beispiel 2 möglich ist. Die Umrechnung kann über einen Faktor von etwa 3,7 hl VB/m³ Abwasser erfolgen. Entsprechend des hohen Energiebedarfs treten die höchsten Emissionen mit 0,58 kg CO₂/m³ beim zweiten Misch- und Ausgleichsbecken auf, diese können beim Einsatz einer Anaerobstufe komplett eingespart werden. Die CO₂-Emissionen der Belebungsstufe reduzieren sich aufgrund der geringeren Fracht um knapp 5 %. Darüber hinaus lassen sich über die Nutzung des Biogases zur Stromerzeugung 0,93 kg CO₂/m³ einsparen. Bezogen auf ein Jahr liegen die CO₂-Emissionen der Belebungsstufe der aeroben Abwasseranlage etwa bei 1.000 t CO₂/a bzw. mit anaerober Vorbehandlung bei 515 t CO₂/a; die Einsparung an CO₂-Emissionen durch die Nutzung des Biogases zur Energieerzeugung berechnet sich zusätzlich zu 600 t CO₂/a, so dass ein CO₂-neutraler Betrieb der Belebungsstufe möglich ist.

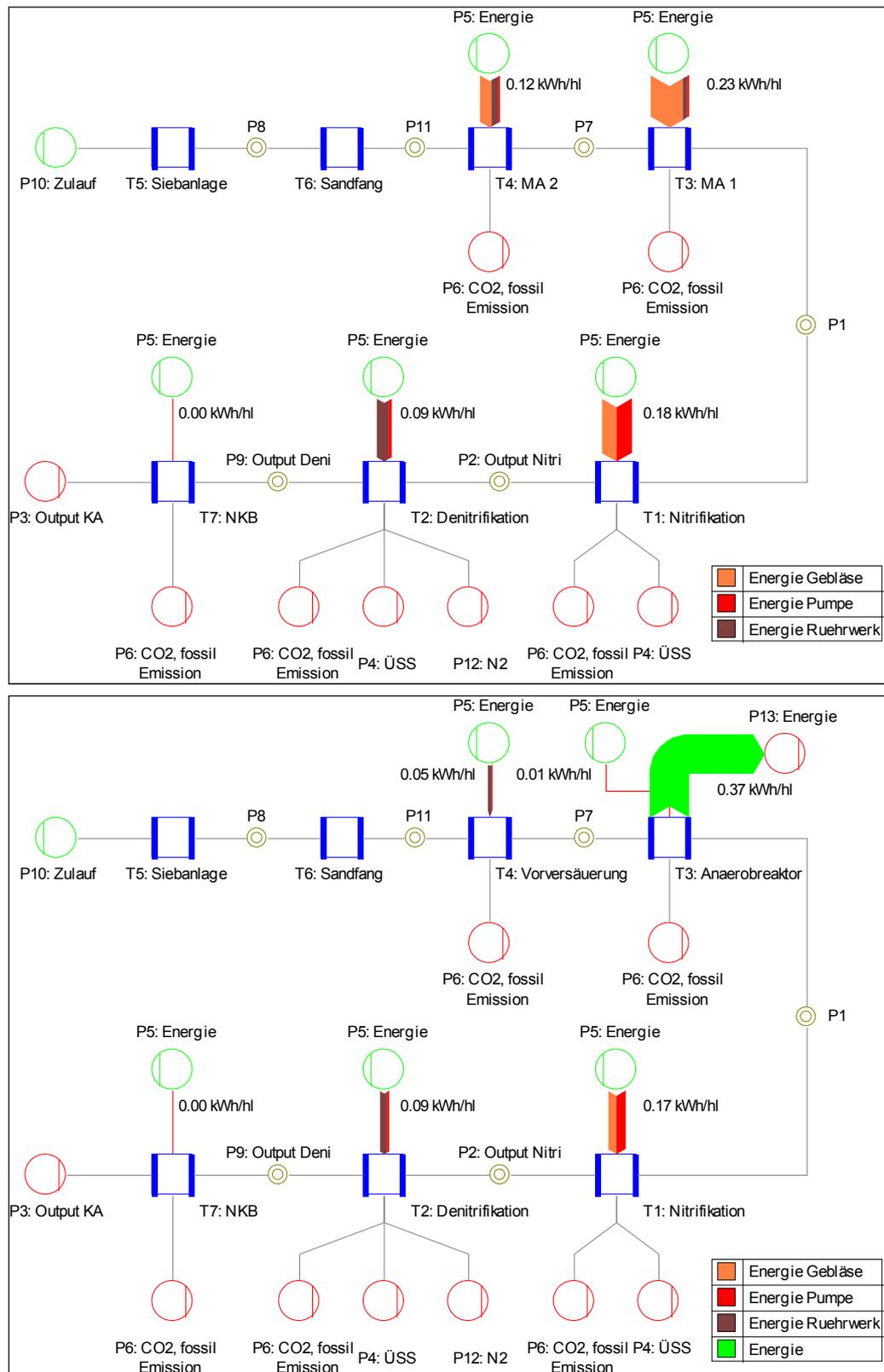


Bild 22: Energiebedarf und Produktion für Beispiel 1a (oben, aerober Direktleiter) und 1b (unten, Direktleiter mit anaerober Vorbehandlung)

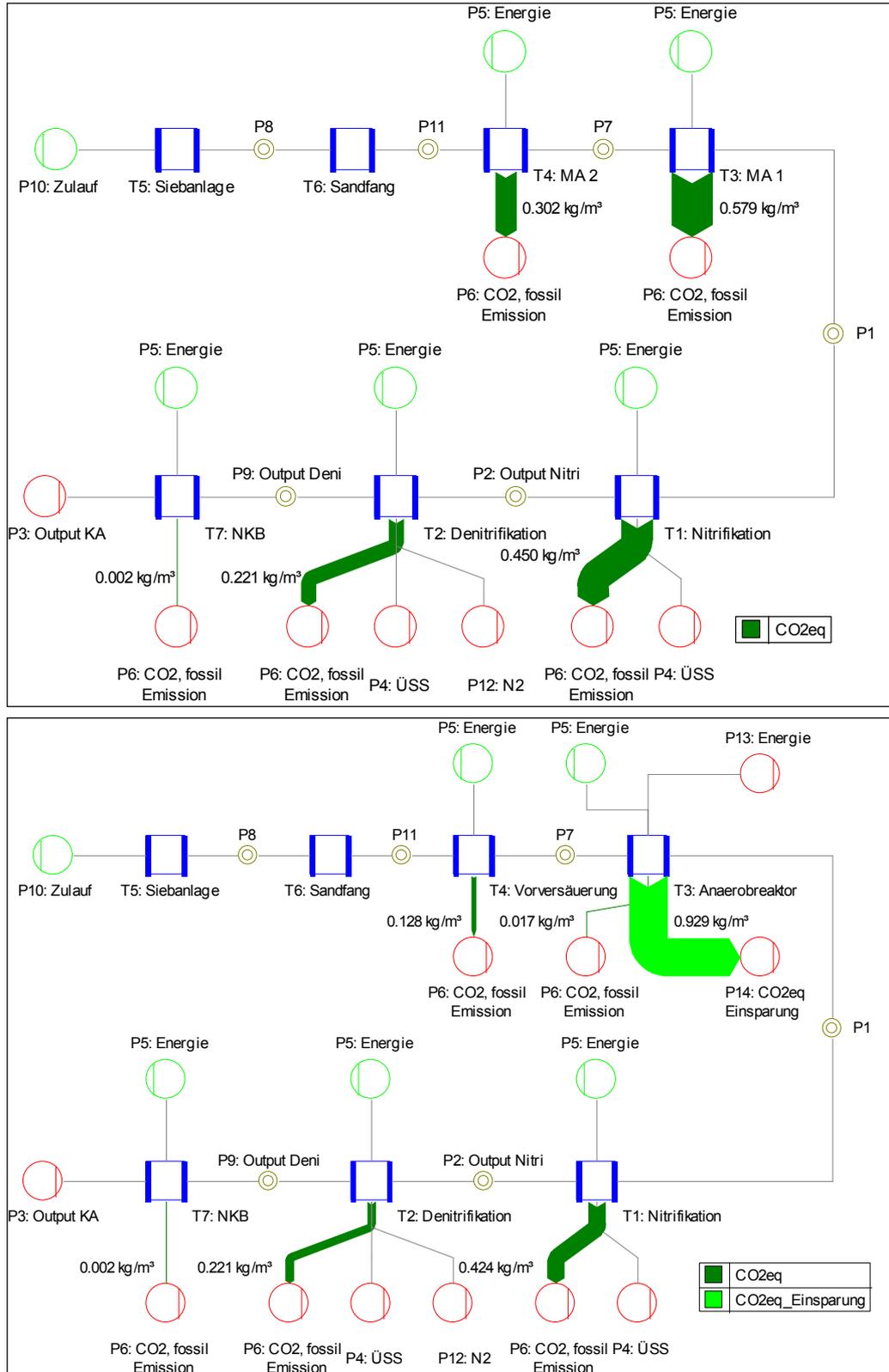


Bild 23: CO₂e-Emissionen für Beispiel 1a (oben, aerober Direktreinleiter) und 1b (unten, Direktreinleiter mit anaerober Vorbehandlung)

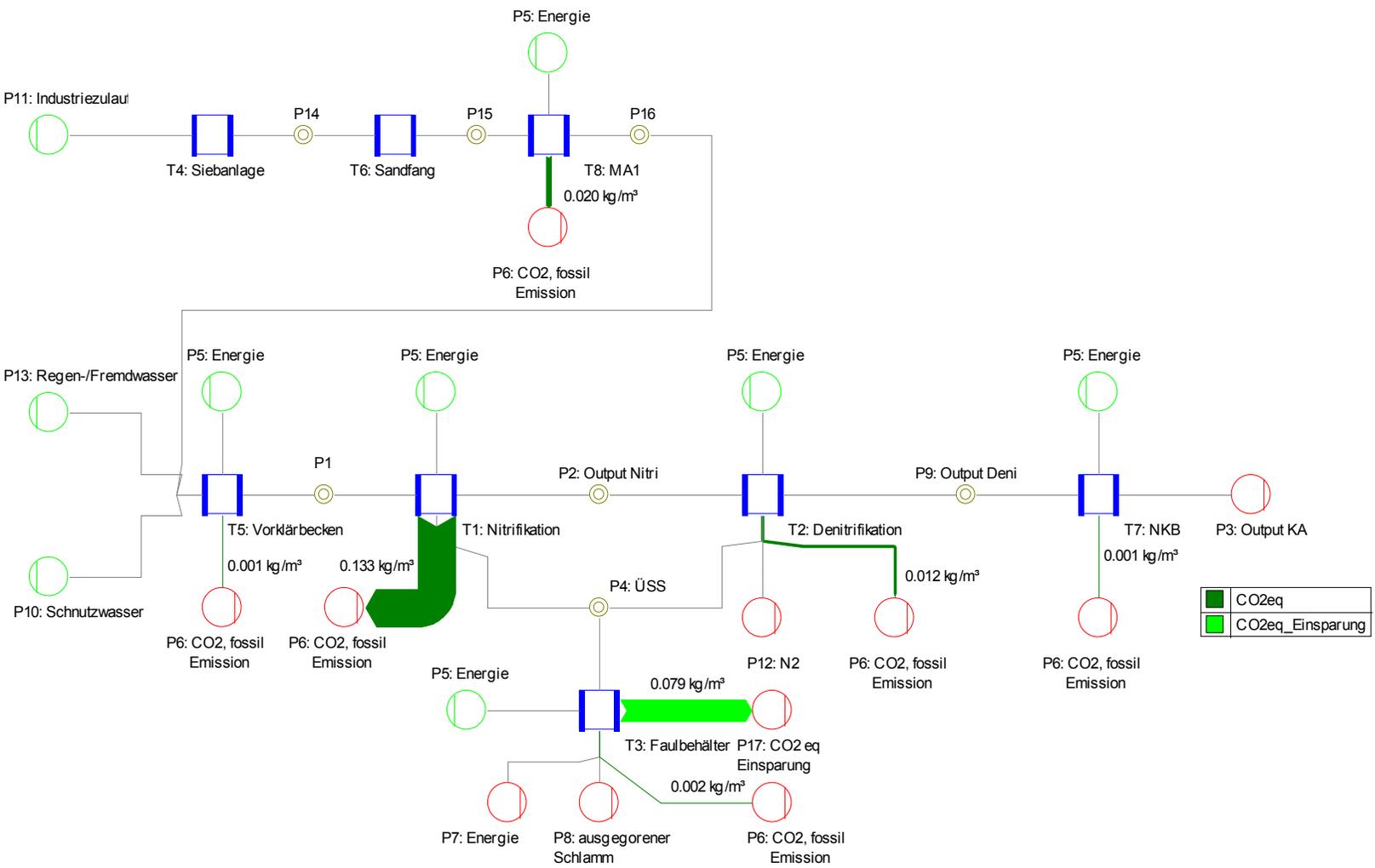


Bild 24: CO₂-Emissionen für Beispiel 2b: Kommunale Kläranlage mit industriellem Indirekteinleiter (nur belüftetes M-A-Becken)

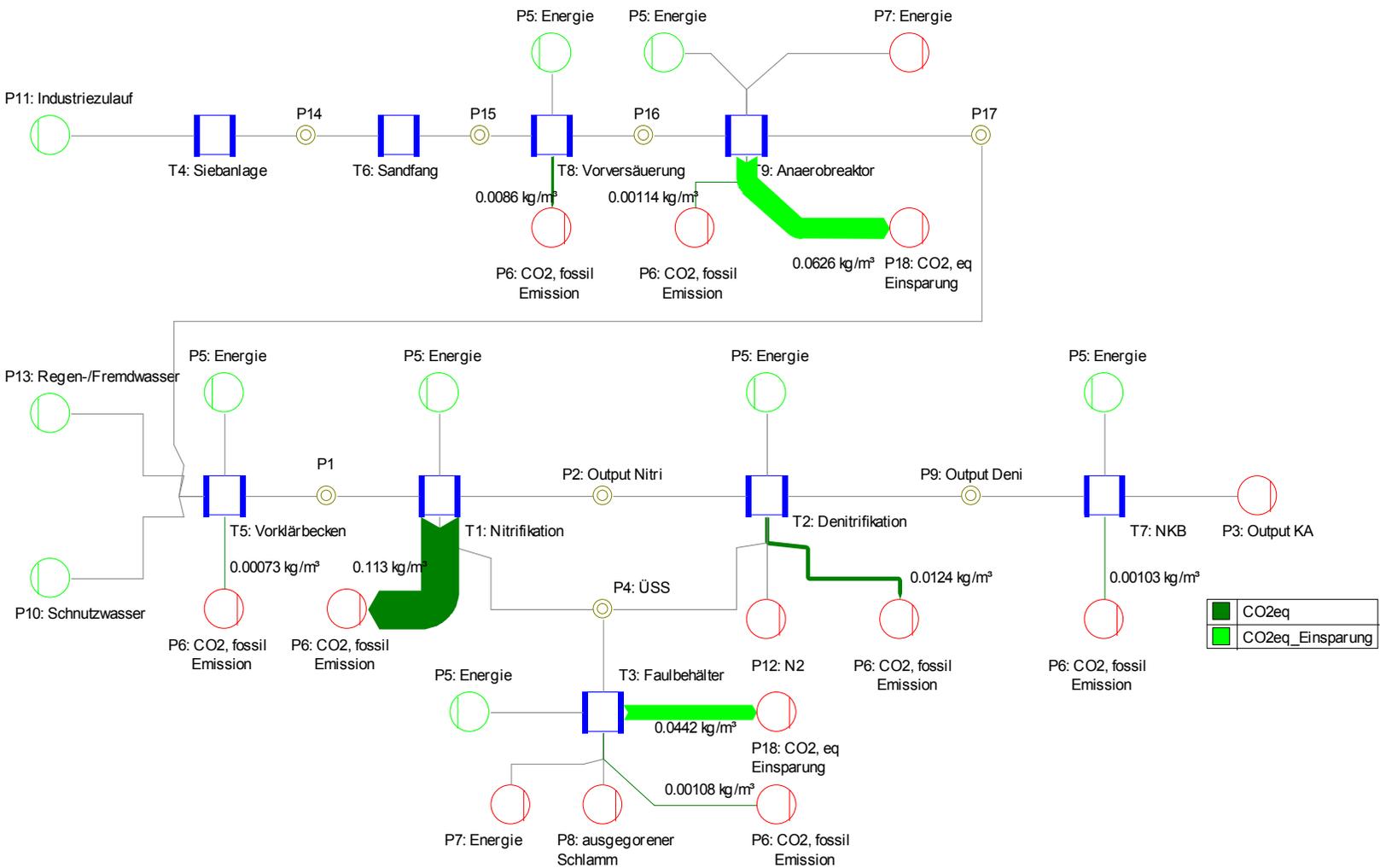


Bild 25: CO₂-Emissionen für Beispiel 2c: Kommunale Kläranlage mit industriellen Indirekteinleiter (mit anaerober Vorbehandlung)

Die Ergebnisse für Beispiel 2b und 2c sind in Bild 24 Bild 25 dargestellt. Der Anteil des Indirekteinleiters an der CSB-Fracht beträgt knapp 25 % (vgl. Tabelle 32). Aufgrund der geringeren Fracht im kommunalen Abwasser liegen die CO₂-Emissionen pro m³ Abwasser geringer als im Beispiel 1. Die CO₂-Emissionen für Beispiel 2b betragen insgesamt etwa 0,17 kg/m³. Durch die Faulgasnutzung können ca. 45 % der Emissionen eingespart werden. Für Beispiel 2c (Indirekteinleiter mit Anaerobstufe) liegen die CO₂-Emissionen insgesamt bei ca. 0,14 kg/m³. Durch die Faulgasnutzung (Faulbehälter + Anaerobstufe) können CO₂-Emissionen von 0,1 kg CO₂/m³ (etwa 70 % des Bedarfs) eingespart werden, so dass ein Großteil des Energiebedarfs der Kläranlage durch die Biogasnutzung gedeckt werden kann.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In kommunalen Kläranlagen wird ein erheblicher Anteil (etwa 1/3) des Energiebedarfs durch Einleitungen von Indirekteinleitern aus der Industrie verursacht. Darüber hinaus ist der Energiebedarf auf den industriellen Kläranlagen selbst bei der Abwasservorbehandlung erheblich. Viele der existierenden industriellen Abwasserbehandlungsanlagen sind vor Jahren errichtet worden und wurden nur dann optimiert, wenn Probleme in der Anlage auftraten. Eine erneute Bewertung dieser Anlagen sowie eine verfahrenstechnische und energetische Optimierung können zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Ein wesentliches Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Ermittlung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der industriellen Abwasserbeseitigung für ausgewählte Branchen in Nordrhein-Westfalen.

Ein Schwerpunkt des Potenzials zur Energieeinsparung wird im Einsatz der Anaerobtechnik gesehen. Durch eine anaerobe Vorbehandlung von geeignetem Produktionsabwasser lässt sich der insgesamt benötigte Energiebedarf der biologischen Behandlung deutlich reduzieren. In Ergänzung zur dadurch eingesparten Energie für die Belüftung der Aerobstufe wird energetisch nutzbares Biogas erzeugt und der Schlammanfall wesentlich verringert.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Energieverbrauch zur Reinigung von industriellem Abwasser für ausgewählte Industriebranchen Nordrhein-Westfalens ermittelt. Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf solche Branchen, in denen organisch hoch belastetes Abwasser anfällt und somit Energieeinsparungs- und -erzeugungspotenziale durch eine Verfahrensumstellung auf z. B. eine anaerobe Vorbehandlung erwartet werden.

Als Datenbasis standen für die Analyse der ausgewählten Branchen statistische Daten des Landesamtes (IT.NRW), des statistischen Bundesamtes (DeStatis) sowie der Energieeffizienzagentur NRW, Angaben der Branchenverbände, Veröffentlichungen in Zeitschriften und im Internet sowie Branchenkenntnisse der an der Erstellung der Studie Beteiligten zur Verfügung. Die verfügbare Datenmenge ist für die einzelnen Branchen unterschiedlich und wurde hinsichtlich ihrer Qualität und Aussagekraft bewertet. In ihrer Gesamtheit ist die recherchierte Datengrundlage ausreichend, um die Zielvorgabe dieser Studie zu erfüllen und spezifische Energiepotenziale zu bestimmen. Es ist allerdings anzumerken, dass aufgrund der vorherrschenden Konkurrenzsituation unter den in Nordrhein-Westfalen ansässigen Industrieunternehmen einer Branche die Bereitschaft betriebsspezifische Informationen (wie Produktionszahlen, Abwasseranfall, Energieeinsatz etc.) zu veröffentli-

chen generell gering ist. Dies gilt auch für die entsprechenden Branchenverbände.

Mögliche Energieeinspar- bzw. -optimierungspotenziale konnten für die Milchverarbeitende Industrie, für die Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie, für die Stärkeindustrie, die Brauwirtschaft, die Zuckerindustrie, für Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe sowie für die Papierindustrie dargestellt werden. Aufgrund ihrer Vielschichtigkeit und der geringen Menge an verfügbaren Daten konnte die Chemische Industrie nicht ausreichend abgebildet werden, um ein branchenspezifisches Einsparpotenzial abzuschätzen. Generell werden allerdings auch in den Unternehmen dieser Branche Energieeinsparpotenziale bei der betrieblichen Abwasserreinigung in nennenswertem Umfang gesehen.

In der Gesamtheit wurden für die oben genannten Branchen (ohne Chemische Industrie) Energieeinspar- bzw. -optimierungspotenziale von ungefähr 94,4 Mio. kWh/a ausgemacht, für deren Realisierung im Wesentlichen der verstärkte Einsatz anaerober Verfahrenstechnik erforderlich ist. Dieses Energieeinsparpotenzial entspricht in etwa 37 % des derzeit in den Branchen vorhandenen Energiebedarfs für die Abwasserreinigung. Die durchgeführte Einzelbetrachtung ermöglicht zudem eine Bewertung der unterschiedlichen Branchen hinsichtlich eines notwendigen Handlungsbedarfs bzw. der energiepolitischen Relevanz.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten bzw. aufgezeigten Energieeinsparpotenziale aus betriebswirtschaftlicher Sicht für die Industriebetriebe nicht immer gleichbedeutend mit einer Handlungsnotwendigkeit sind. Vor einer Projektrealisierung sind aus betriebswirtschaftlicher und verfahrenstechnischer Sicht immer die betriebsspezifischen Randbedingungen vor Ort detailliert zu prüfen.

Im Rahmen der Studie wurden der spezifische und der Gesamtenergiebedarf der Abwasserbehandlung von Brauereiabwasser beispielhaft für einen Direkt- und einen Indirekt- einleiter ermittelt und in dynamischen Langzeitsimulationen unter Berücksichtigung der Schwankungen analysiert. Es zeigt sich, dass die dynamische Modellierung den Grad der Genauigkeit der Gesamtaussage verbessert und diese bei stärkeren Schwankungen im Tages-, Wochen- oder Monatsgang notwendig ist.

Die Ergebnisse der Berechnungen der dynamischen Simulation des Indirekteinleiters und des Direkteinleiters machen das große Energiepotenzial der Industrieabwasserbehandlung deutlich. Durch interne Maßnahmen (z.B. Reduzierung des Rezirkulationsvolumenstroms, Regelung des Schlammalters) können beim Direkteinleiter bis zu 5 % des derzeitigen Energieverbrauchs eingespart werden. Die Verbesserung der Anlagentechnik (optimierte Rührer, verbesserte Belüftungssysteme) kann zu einer weiteren Einsparung von bis zu 10 % führen. Das größte Potenzial bietet bei stark organisch belastetem Abwasser die Änderung der Verfahrenstechnik. Durch eine anaerobe Vorbehandlung können für das Beispiel aus der Brauereiwirtschaft unter Berücksichtigung der Verwertung des erzeugten Biogases mehr als 100 % des Energiebedarfs ($\sim 1 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{hl VB}$) eingespart werden. Ein energie- und CO_2 -neutraler Betrieb der Industriekläranlage ist so möglich.

Auch für die industriellen Indirekteinleiter besteht ein erhebliches Einsparpotenzial: Durch die Umstellung auf eine anaerobe Vorbehandlung bei einem Indirekteinleiter mit einem Anteil von ca. 25 % an der CSB-Fracht lassen sich ca. 15 % des Energiebedarfs der kommunalen Kläranlage einsparen. Insgesamt kann durch die Verfahrensumstellung der Indirekteinleiter die notwendige Energie für die eigene Abwasserbehandlung komplett decken (Einsparung: $\sim 0,3 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{hl VB}$) und bis 0,2 - 0,25 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{hl VB}$ zusätzlich produzieren.

Die Berechnungen mit der Software UMBERTO zeigen für die beiden Beispiele (Indirekt- bzw. für den Direkteinleiter) ein CO_2 -Einsparpotenzial von etwa 550 bzw. 1.100 t CO_2/a . Grundsätzlich sind die Ergebnisse innerhalb dieser Branche übertragbar, wobei die Höhe des jeweiligen Einsparpotenzials stark von der bestehenden Verfahrenstechnik und den vorhandenen Aggregaten abhängig ist. Für die Betrachtung anderer Branchen werden weitere Langzeitsimulationen empfohlen.

Im Rahmen dieser Studie ließ sich zeigen, dass die dynamische Modellierung ein geeignetes Werkzeug für die Durchführung unterschiedlicher Lastfall-Berechnungen ist. Insbesondere bei starken Jahresganglinien sind dynamische Berechnungen notwendig, um den tatsächlichen Sauerstoffbedarf und Biogasertrag erfassen zu können. Die Bilanzierung mit UMBERTO ermöglicht darüber hinaus eine übersichtliche Darstellung von Stoff- und Energieströmen. Auf diese Weise können Hauptverbraucher schnell erkannt und optimiert werden.

Dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen wird mit dieser Studie ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, dass in den entsprechenden Branchen zielführend zum Start konkreter Projekte genutzt werden kann.

Zur weiteren Absicherung und Verifizierung der branchenweiten bzw. -übergreifenden Aussagen zu Energieeinsparpotenzialen ist eine Verbesserung der Datengrundlage erforderlich. Vor dem Hintergrund der durchgeführten Datenrecherche scheint dies insbesondere für die indirekteinleitenden Industriebetriebe notwendig. Wünschenswert wäre es daher, die vorhandenen Direkt- und Indirekteinleiterdatenbanken NIKLAS-IGL (2010) bzw. INKA (2010) zu vervollständigen und um energiespezifische Kennwerte zu ergänzen.

Für eine verbesserte Darstellung vorhandener Energieeinspar- bzw. -optimierungspotenziale in der für Nordrhein-Westfalen bisher nur unvollständig erfassten Branche der Chemischen Industrie ist die beispielhafte Untersuchung der Stoffströme eines Industrieparks empfehlenswert. Ein passend ausgewähltes Beispiel sollte neben einer hohen organischen Abwasserbelastung möglichst auch hohe Stickstoffwerte zumindest in Teilströmen aufweisen. Dies würde es ermöglichen, unterschiedliche energieeffiziente Verfahrenstechniken (z.B. Anaerobtechnik mit Deammonifikation) miteinander zu kombinieren und in einer Gesamtbetrachtung zu analysieren und zu bewerten. Auch hier erscheint eine Langzeitsimulation besonders zielführend, um im Vergleich zwischen bisheriger Anlagenkonzeption und einer optimierten Verfahrenstechnik die Energieeinsparpotenziale auch unter Berücksichtigung auftretender Belastungsschwankungen konkret zu ermitteln.

Generell weist ein entsprechend ausgewählter Industriepark der Chemischen Industrie eine hohe Vielfalt unterschiedlich zusammengesetzter Abwasserströme auf. Zumindest in einzelnen Teilströmen werden hier erhebliche Einsparpotenziale durch den Einsatz energieeffizienter Verfahrenstechniken vermutet.

Grundsätzlich wird für eine solche Analyse eine gute Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Industriestandorte erwartet.

8 Literatur

- AbwV (2004): Verordnung über das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, BGBl. I S. 1106, 17. Juni 2004
- ATV (1990): Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern.1 Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 7.5, Korrespondenz Abwasser, 37. Jg., H. 10, 1990, S. 1247-1251
- ATV-DVWK-M 776 (2002): Abwasser der Stärke-Industrie Gewinnung nativer Stärke, Herstellung von Stärkeprodukten durch Hydrolyse und Modifikation. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.4 „Stärkeindustrie“, Hennef
- ATV-DVWK-M 778 (2003): Abwasser aus Hefefabriken und Melassebrennereien. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Arbeitsgruppe IG 2.11 „Hefeindustrie“, Hennef
- ATV-M 766 (1999): Abwasser der Erfrischungsgetränke-, der Fruchtsaft-Industrie und der Mineralbrunnen. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.13 „Abwasser der Erfrischungsgetränke-, der Fruchtsaftindustrie und Mineralbrunnen“, (Entwurf 2011) Hennef
- ATV-M 767 (1992): Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.15 „Schlacht- und Fleischbe- und verarbeitungsbetriebe“, Hennef
- ATV-M 770 (1995): Behandlung und Verwertung von Reststoffen aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.15 „Schlacht- und Fleischbe- und verarbeitungsbetriebe“, Hennef
- Austermann-Haun, U. und Rosenwinkel, K.-H. (2000): Fruchtsaftfabriken, Erfrischungsgetränkeherstellung und Mineralbrunnen. In: ATV-Handbuch: Industrieabwasser Lebensmittelindustrie, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.), Hennef, ISBN-10: 3-433-01467-1
- Austermann-Haun, U. und Seyfried C.F. (2000): Stärkefabriken. In: ATV-Handbuch: Industrieabwasser Lebensmittelindustrie, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.), Hennef, ISBN-10: 3-433-01467-1
-

- Baraňao, P. A. und Hall, E. R. (2004): "Modelling carbon oxidation in pulp mill activated sludge systems: calibration of Activated Sludge Model No. 3" Water Science & Technology, 50(3), pp. 1-10
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H. und Vavilin, V. A. (2002): "Anaerobic Digestion Modell No. 1 (ADM1), Scientific and Technical Report No. 13" IWA Publishing, London, UK
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.-H. und Seyfried, C. F. (2005): "Anaerobtechnik - Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm" Springer Verlag, 2. Auflage
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.-H., Seyfried, C. F., Böhnke, B., (Hrsg.) (2005): Anaerobtechnik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- BMU (2006): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung, Stand: Mai 2006
- Brauwelt (2010): Die 30 größten Getränkehersteller 2009. Brauwelt – Wochenzeitschrift für das Getränkewesen, Heft Nr. 41, Seite 1216, Fachverlag Hans Carl GmbH, Nürnberg
- Brauwelt (2010): Inlandsabsatz der 56 größten Biermarken über 0,3 Millionen Hektoliter 2009. Brauwelt – Wochenzeitschrift für das Getränkewesen, Heft Nr. 21-22, Seite , Fachverlag Hans Carl GmbH, Nürnberg
- BVL, 2011 Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2011): Zugelassene Schlachtbetriebe in Deutschland.
http://btl.bvl.bund.de/btl/kategorie_anzeigen.jsp?id=3
- DESTATIS (2011): Bierabsatz NRW
- Deutscher Verband der Hefeindustrie e.V. (2011): <http://www.hefeindustrie.de/index-hefe.html>
- Doedens, H. (2000): Verarbeitung von Milch und Milchprodukten. In: ATV-Handbuch: Industrieabwasser Lebensmittelindustrie, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.), Hennef, ISBN-10: 3-433-01467-1
- DWA M 708 (20xx) AG 2.5 (20xx): Abwasser bei der Milchverarbeitung. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.5 „Molkereien“ (Entwurf November 2010), Hennef
-

DWA-IG 5.1 DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.,
Arbeitsgruppe IG 5.1 „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“,
Hennef

Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe:

(1990): Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern. 1. Arbeitsbe-
richt, Korrespondenz Abwasser, 37 (1990) H. 10, S. 1247-1251

(1993): Technologische Beurteilungskriterien zur anaeroben Abwasserbehandlung. 2.
Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrie-
abwässern“, Korrespondenz Abwasser, 40 (1993) H. 2, S. 217-223

(1994): Geschwindigkeitsbestimmende Schritte beim anaeroben Abbau von organi-
schen Verbindungen in Abwässern. 3. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe „Anaerobe
Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“, Korrespondenz Abwasser, 41
(1994) H. 1, S. 101-107

(2002): Praktische Empfehlungen und Hinweise für Anaerobanlagen. 4. Arbeitsbericht
der Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“,
Korrespondenz Abwasser (49) Nr. 12, 2002, 1708-1714

(2004): Anaerobe Testverfahren zu Abbaubarkeit, Hemmung und Aktivität. 5. Arbeits-
bericht der Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwäs-
sern“, KA – Abwasser, Abfall 2004 (51) Nr. 9, S. 997-1002

(2007): Leitfaden zur Durchführung von Pilotversuchen im halbtechnischen Maßstab.
6. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Indust-
rieabwässern“, Download im Mitgliederbereich der DWA-Homepage www.dwa.de

(2009): Anaerobe Reaktoren und ihre Einsatzbereiche. 7. Arbeitsbericht der Arbeits-
gruppe „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“, Korrespon-
denz Abwasser, Abfall (56) Nr. 11, S. 1147-1152

(2011): Auswahl und Bewertung von Systemen und Reaktoren zur anaeroben Indust-
rieabwasserbehandlung. 8. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe „Anaerobe Verfahren zur
Behandlung von Industrieabwässern“ in Bearbeitung

DWA-M 710 (2008): Abwasser aus der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte. DWA -
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Arbeitsgruppe
IG 2.18 „Abwasser aus der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte“, Hennef

DWA-M 713 (2007): Abwasser aus der Zuckerindustrie. DWA - Deutsche Vereinigung für
Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Arbeitsgruppe IG 2.3 „Zuckerindustrie“,
Hennef

DWA-M 731 (2011): Abwasser und Abfälle aus der Papierherstellung. DWA - Deutsche
Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Arbeitsgruppe IG 2.20
„Abwasser und Abfälle aus der Papierherstellung“ (August 2011), Hennef

- DWA-M 732 (2010): Abwasser aus Brauereien. DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Arbeitsgruppe IG 2.10 „Brauereien“, Hennef
- EG (2002): Verordnung Nr. 1774/2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte. ABl. L273, Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates
- Fachverband der Stärkeindustrie (2009): Zahlen und Fakten zur Stärkeindustrie Ausgabe 2009. http://www.staerkeverband.de/downloads/FSI_zahlen2008.pdf sowie persönliche Mitteilungen
- Fries, D. und Schrewe, N. (2000): Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe. In: ATV-Handbuch: Industrieabwasser Lebensmittelindustrie, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.), Hennef, ISBN-10: 3-433-01467-1
- Gujer, W., Henze, M., Mino, T. und Loodsrecht, M. v. (1999): "Activated Sludge Model No. 3" Water Science & Technology, 39(1), pp. 183-193
- Haberkern, Maier, Schneider (2006): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 205 26 307, Umweltbundesamt (Hrsg.)
- Hartwig, P., Rosenwinkel, K.-H., Beier, M. (2008): Das PANDA/PANDA+-Verfahren – Betriebserfahrungen zur Nitrifikation/ Denitrifikation auf großtechnischen Anlagen mit hohem Industrieanteil. Bremer Colloquium Produktionsintegrierte Wasser-/ Abwassertechnik, „Abwassertechnik der Zukunft“ - Nachhaltige Lösungskonzepte, Universität Bremen, Institut für Umweltverfahrenstechnik
- INKA (2010): Indirekteinleiter-Kataster. Datenmodell (INKA, Version A16, Stand:10/2010). Die Datenbank wurde durch das Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt.
- ISA (2007): Innovatives Betriebs- und Verfahrenskonzept zur energetischen Nutzung von kommunalem und industriellem Abwasser im Verbund. Abschlussbericht / Machbarkeitsstudie gerichtet an das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, FKZ: AZ IV-9-042 IC3, RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Aachen
-

- ISAH (2004): Untersuchungen zum Stand der Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Lebensmittelindustrie unter Zugrundelegung der EG-IVU-Richtlinie und Entwicklung von BVT-Merkblättern. Abschlussbericht gerichtet an das Umweltbundesamt, FKZ: 298 94 307/02, Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH), Hannover
- IT.NRW (2007): Statistische Berichte Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen 2007
- IT.NRW (2011): Liste der Schlachtungen in NRW
www.it.nrw.de/statistik/i/daten/schnellmeldungen/schlachtungen.xls
- Jördening, H.-J. (2000): Abwasser aus Zuckerfabriken. ATV-Seminar Abwasserbehandlung in der Ernährungs- und Getränkeindustrie, 19.10.2000, technische Akademie Esslingen
- Jung, H., Hentschke, J., Pongratz, B., Götz, B. (2009): Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie – Ergebnisse der Wasserumfrage 2007. Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 6-7, 2009
- Kaste, Müller, Kobel (2006): Verfahrenstechnische Potenziale bestehender Kläranlagen – Auswertung von mehr als 100 Energieanalysen, in: 39. Essener Tagung, Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, Band 202, J. Pinnekamp (Hrsg.)
- Koch, G., Kühni, M., Gujer, W. und Siegrist, H. (2000): "Calibration and Validation of Activated Sludge Model No. 3 for Swiss Municipal Wastewater" Water Research, 34(12), pp. 3580-3590
- Landesvereinigung der Milchwirtschaft in Nordrhein-Westfalen e.V. (2009): Milchwirtschaft in Nordrhein-Westfalen 2009-Zahlen, Daten, Fakten.
- MUFV-RLP (2007): Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft – Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Remscheid
- MUNLV-NRW (2008): Leitfaden zur medienübergreifenden Betrachtung der Vermeidung und Verwertung von Abfällen und Abwässern in Produktionsanlagen der Chemischen Industrie. Endbericht zum Branchenprogramm Chemieanlagen § 5 (1) Nr. 3 BImSchG, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
www.umwelt.nrw.de/umwelt/betrieb_umwelt/chemische_industrie/index.php
-

- MURL (1999): Energie in Kläranlagen - Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)
- MURL (1999): Energie in Kläranlagen – Handbuch, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)
- NIKLAS-IGL (2010): Neues Integriertes Klär-Anlagensystem für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft. Datenmodell (NIKLAS-IGL, Version 6.0/0002, Stand:10/2010). Die Datenbank wurde durch das Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt.
- Pardo, A. L. P., Brdjanovic, D., Moussa, M. S., Lopez-Vazquez, C. M., Meijer, S. C. F., Van Straten, H. H. A., Janssen, A. J. H., Amy, G. und Van Loosdrecht, M. C. M. (2007): Modelling of an Oil Refinery Wastewater Treatment Plant, Taylor & Francis. 28: 1273 - 1284.
- Rosenwinkel, K.-H. (2011): Anaerobtechniken zur Vorbehandlung von Abwasser (Kohlenstoff- und Stickstoffelimination). WasserWirtschafts-Kurs N5, Behandlung von Industrie- und Gewerbeabwasser, Kassel
- RWE (2009): Stromkennzeichnung der RWE Vertrieb AG für das Jahr 2009. Internet: <http://www.rwe.com/web/cms/de/74630/kunde/stromkennzeichnung/> ; letzter Zugriff: 25.06.2011
- Sander, M., Trautmann, N., Beier, M., Rosenwinkel, K.-H. (2010): Potenziale der Deammonifikation – Innovationen im Bereich der Stickstoffelimination. In 11. Hannoverische Industrieabwasser-Tagung: Wassermanagement in der Industrie, Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover, Heft 148
- Seyfried, C. F. (1988): Verfahrenstechnik der anaeroben Abwasserreinigung – Theorie und Praxis. Preprints "Verfahrenstechnik der mechanischen, thermischen, chemischen und biologischen Abwasserreinigung" Band 2 (GVC-Tagung, 17.-19.10.1988, Baden-Baden), S. S. 99-136
- Statistisches Bundesamt (2011): Schlachtungen und Fleischerzeugung. In: Statistisches Bundesamt: „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“, Fachserie 3, Reihe 4.2.1, Wiesbaden
-

Thöle, D., Utecht K.-U, und Schmitt, F. (2004): Praktische Erfahrung mit der Umsetzung von Energiesparmaßnahmen auf Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2004 (51), Nr. 6, p. 619-624

Umwelt-Bundesamt (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2008 und erste Schätzung 2009. Berlin.

VdF Verband der Deutschen Fruchtsaftindustrie (2010): Persönliche Mitteilung und Informationen aus dem Internet:

http://www.fruchtsaft.org/index.php?menu_sel=13&menu_sel2=3&menu_sel3=&menu_sel4=&msg=44

VDM - Verband der Deutschen Milchwirtschaft e.V. (2003): Richtlinien für Wasser und Abwasser in Molkereien. Verband der Deutschen Milchwirtschaft e.V. (VDM), Bonn, ISBN-10: 3-88579-114-5

VdP Verband Deutscher Papierfabriken (2010): Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken. http://www.vdp-online.de/pdf/PressekonferenzZahlen2010_deutsch.pdf

Wagner, M. (2001): Neue Tendenzen bei der Belüftungstechnik. 64. Darmstädter Seminar - Abwassertechnik, Neues zur Belüftungstechnik - Probleme, Lösungsmöglichkeiten, Entwicklungen. Institut WAR (Hrsg.), Darmstadt

Wirtschaftliche Vereinigung Zucker, Verein der Zuckerindustrie (2011): www.zuckerverbaende.de

Wirtschaftsverband der Rheinisch-Westfälischen Papiererzeugenden Industrie e.V. (2011): www.papier-nrw.de

9 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheitenbeispiel	Ergänzungseinheit	Erläuterung
ABwV	-	-	Abwasserverordnung
ADM1	-	-	Anaerobic Digestion Model No. 1
AOX	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
ARA	-	-	Abwasserreinigungsanlagen
ASM3	-	-	Activated Sludge Model No. 3
ATV	-	-	Abwassertechnische Vereinigung (jetzt DWA)
B _{d, xxx}	kg/d		Tägliche Fracht des Parameters XXX
BHKW	-	-	Blockheizkraftwerk
BMU	-	-	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSB ₅	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BVL	-	-	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
BVT	-		Beste verfügbare Techniken
C	-	-	Kohlenstoff
CH ₄	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Methan
CO ₂	-	-	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}		-	Kohlenstoffdioxid – Äquivalent
CSB	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Chemischer Sauerstoffbedarf
DeStatis	-	-	Statistisches Bundesamt
DWA	-	-	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EGSB-Reaktor	-	-	Expanded Granular Sludge Blanket-Reaktor
et al.	-	-	und andere
EW _{xxx}	E	-	Einwohnerwert bezogen auf den Parameter XXX
FrSaftV	-	-	Fruchtsaftverordnung
H	-	-	Wasserstoff
hl VB	hl	-	Hektoliter Verkaufsbier
i _{NSS}	-	-	N-Gehalt der leichtabbaubaren Stoffe

Abkürzung	Einheitenbeispiel	Ergänzungseinheit	Erläuterung
i.d.F	-	-	in der Form
Inkl.	-	-	Inklusive
ISAH	-	-	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover
IT.NRW	-	-	Information und Technik Nordrhein-Westfalen
INKA	-	-	Inkunabel-Katalog deutscher Bibliotheken
KN	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Kjeldahl Stickstoff
kWh	kWh	-	Kilowatt pro Stunde
LANUV	-	-	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
M-A-Becken	-	-	Misch- und Ausgleichsbecken
MKULNV	-	-	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MUFL-RLP	-	-	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz
MURL	-	-	Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft
N ₂	-	-	Stickstoff
NH ₄ -N	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Ammonium-Stickstoff
NIKLAS-IGL	-	-	Neues integriertes Kläranlagensystem – für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft
NO ₃ -N	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Nitrat-Stickstoff
NRW	-	-	Nordrhein-Westfalen
O ₂	-	-	Sauerstoff
OC	kg/h	-	Sauerstoffzufuhr einer Belüftungseinrichtung in Reinwasser
oTr	-	-	Volumenbezogener Sauerstoffübergangskoeffizient
P	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Phosphor

Abkürzung	Einheitenbeispiel	Ergänzungseinheit	Erläuterung
pH	-	-	Negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Ionen-Konzentration
Q	z.B. m ³ /h	-	Volumenstrom
SBR	-	-	Sequencing Batch Reactor
SO ₄ -S	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	Sulfatschwefel
T	°C	-	Temperatur
TN _b	Konzentration z.B. mg/l	Fracht z.B. kg/d	gebundener Stickstoff
TOC	Konzentration z.B. g/l	Fracht z.B. kg/d	Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
UASB-Reaktor	-	-	Upflow Anaerobic Sludge Blanket-Reaktor
V	z.B. m ³	-	Volumen
VDM	-	-	Verband deutscher Milchwirtschaft e.V.
η _{xxx}	-	-	Abbaugrad bezogen auf den Parameter XXX

10 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Fraktionen des ASM3	7
Tabelle 2: In der Direkteinleiterdatenbank NIKLAS-IGL erfasste Betriebe, entsprechend den Anhängen der Abwasserverordnung nach Branchen sortiert (NIKLAS-IGL, 2010)	20
Tabelle 3: Spezifische Kennzahlen für Molkereiabwasser (VDM, 2003)	22
Tabelle 4: In Nordrhein-Westfalen produzierte Milcherzeugnisse für das Jahr 2009	24
Tabelle 5: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die milchverarbeitende Industrie Nordrhein-Westfalens	25
Tabelle 6: Wesentliche Abwasserparameter für die Produktion von Frucht- und Gemüsesäften (Austermann-Haun und Rosenwinkel, 2000)	28
Tabelle 7: Spezifische Abwasserkennwerte für die Fruchtsaftproduktion	29
Tabelle 8: In Nordrhein-Westfalen ansässige Großbetriebe aus der Erfrischungsgetränke- und Fruchtsaftindustrie (inkl. Mineralbrunnen) mit Produktionszahlen für das Jahr 2009	31
Tabelle 9: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die Fruchtsaftindustrie Nordrhein-Westfalens	32
Tabelle 10: Abwassercharakteristik für Brüdenkondensat aus der Maisstärkefabrikation (Austermann-Haun und Seyfried, 2000)	33
Tabelle 11: Kennwerte für unbehandeltes Produktionsabwasser aus der Weizenstärkefabrikation (Abwasseranfall: etwa 2,5 m ³ /t Mehl) (ATV-DVWK M 776, 2002)	34
Tabelle 12: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung für die Stärkeindustrie Nordrhein-Westfalens	36
Tabelle 13: Spezifische Kennwerte für Abwasser aus Brauereien	38
Tabelle 14: Zusammenstellung der absatzstärksten Brauereien Nordrhein-Westfalens für das Jahr 2009	40
Tabelle 15: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Brauwirtschaft Nordrhein-Westfalens	41
Tabelle 16: Richtwerte für Abwasser aus Zuckerfabriken (Jördening, 2000)	43
Tabelle 17: Abwasserteilströme bei der Backhefeproduktion aus Melasse	45
Tabelle 18: Spezifische Abwasserkennwerte aus der Hefeproduktion	46
Tabelle 19: Spezifische Schmutzfrachten für das Abwasser aus der Hefeproduktion in Abhängigkeit einzelner Produktionsverfahren (ATV-DVWK-M 778, 2003)	46
Tabelle 20: Spezifische Abwassermengen und Schmutzfrachten bei Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben (Niedersächsisches Wasseruntersuchungsamt Hildesheim, aus Fries und Schrewe, 2000)	49
Tabelle 21: Spezifische Abwassermengen und Schmutzfrachten für einzelne Produktionsbereiche der Fleischwirtschaft (ISAH, 2004)	50

Tabelle 22: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe Nordrhein-Westfalens	54
Tabelle 24: Auszug aus „Schlachtungen und Fleischerzeugung im 1.Quartal 2011“ (Statistisches Bundesamt, 2011)	57
Tabelle 25: Zusammenstellung typischer Produkte aus der Tierkörperverwertung	57
Tabelle 26: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung anhand eines Beispielbetriebes zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte	59
Tabelle 27: Spezifische Kennwerte für Abwasseranfall und Schmutzfrachtkonzentrationen bei der Papierherstellung in Abhängigkeit von der Produktgruppe (DWA-M 731, 2011)	61
Tabelle 28: Abschätzung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung der Papierindustrie Nordrhein-Westfalens	65
Tabelle 29: Anlagen nach Nr. 4 des Anhangs der 4. BImSchV in NRW (Stand 31.12.2008, aus: Leitfaden Chemische Industrie, MUNLV-NRW, 2008)	67
Tabelle 30: Gesamtbetrachtung des vorhandenen Energieeinsparpotenzials in der Abwasserreinigung ausgewählter Industriebranchen für Nordrhein-Westfalen	72
Tabelle 31: Kennwerte der im Rahmen der Modellierung betrachteten Aggregate	77
Tabelle 32: Vergleich von Frachten und Mengen im Zulauf zur Belebung der kommunalen Anlage	85
Tabelle 33: Kennwerte für Beispiel 1	92
Tabelle 34: Kennwerte für Beispiel 2	92
Tabelle 35: Kennwerte der Anaerobstufen für beide Beispiele	93

11 Verzeichnis der Bilder

Bild 1: Grundtypen anaerober Reaktoren (nach Seyfried (1988), erweitert)	12
Bild 2: Nichtöffentlich beseitigte Abwassermenge in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2007 (IT.NRW, 2007)	15
Bild 3: Nichtöffentlich beseitigte Abwassermenge in Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2007, nach Wirtschaftszweigen geordnet (IT.NRW, 2007)	16
Bild 4: Betriebe, die Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (2007), nach Wirtschaftszweigen geordnet (IT.NRW, 2007)	17
Bild 5: Anzahl der Betriebe, die im Wirtschaftszweig Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (IT.NRW, 2007); inklusive Unterscheidung zwischen Betrieben mit und ohne Abwasserreinigungsanlagen (ARA)	18
Bild 6: Im Wirtschaftszweig Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung in Nordrhein-Westfalen nicht öffentlich beseitigte Abwassermenge für das Jahr 2007; inklusive Unterscheidung zwischen direkt und indirekt eingeleiteter Wassermenge (IT.NRW, 2007)	18
Bild 7: Anzahl der Betriebe, die im Wirtschaftszweig Papiergewerbe Abwasser in Nordrhein-Westfalen nichtöffentlich beseitigen (IT.NRW, 2007); inklusive Unterscheidung zwischen Betrieben mit und ohne Abwasserreinigungsanlagen (ARA)	62
Bild 8: Im Wirtschaftszweig Papiergewerbe in Nordrhein-Westfalen nicht öffentlich beseitigte Abwassermenge für das Jahr 2007; inklusive Unterscheidung zwischen direkt und indirekt eingeleiteter Wassermenge (IT.NRW, 2007)	63
Bild 9: Vereinfachtes Schema einer möglichen Struktur zum Abwassermanagement (aus: Leitfaden Chemische Industrie, MUNLV-NRW, 2008)	68
Bild 10: Branchenspezifische Darstellung des Anteils der ermittelten Energieeinsparpotenziale am jeweiligen Gesamtenergieverbrauch für die Industrieabwasserreinigung	74
Bild 11: Modell der in Beispiel 1 betrachteten Industriekläranlage	76
Bild 12: Elektrischer Energiebedarf der realen Anlage bezogen auf die produzierte Menge Verkaufsbier [kWh/hl VB] im Vergleich zur Simulation mit schwankenden und konstanten Zulaufwerten	79
Bild 13: Energiebedarf [kWh _{el} /hl VB] über den Untersuchungszeitraum bei optimierter Belüftung im Vergleich zur Standardvariante	81
Bild 14: Energiebedarf [kWh _{el} /hl VB] über den Untersuchungszeitraum bei reduziertem internem Recycle und reduziertem Energiebedarf der Rührer im Vergleich zur Standardvariante	81
Bild 15: Energieproduktion berechnet aus der Biogasproduktion für die Simulation mit Mittelwerten und die Simulation mit schwankenden Zulaufwerten	83
Bild 16: Elektrischer Energiebedarf und elektrische Energieproduktion der Gesamtanlage (Anaerobe Vorbehandlung mit nachgeschalteter Belebungsstufe)	84

Bild 17: Energiebedarf der Belebungsstufe einer kommunalen Kläranlage mit und ohne Indirekteinleiter bezogen auf Q_{Zu}	86
Bild 18: Energiebedarf der Belebungsstufe einer kommunalen Kläranlage mit Indirekteinleiter ohne wesentliche Vorbehandlungsstufe (belüftetes M-A-Becken) und mit Indirekteinleiter nach Anaerobstufe	87
Bild 19: Energiebedarf/-produktion bei Variation des Indirekteinleiter-Anteils	88
Bild 20: Energiebedarf und -produktion einer kommunalen Anlage mit Indirekteinleiter (24 % der CSB-Fracht) bei unterschiedlichen C/N-Verhältnissen im Industrieabwasser (Zulauf der Anaerobstufe)	89
Bild 21: UMBERTO-Fließbild des aeroben Direkteinleiters (Brauerei)	91
Bild 22: Energiebedarf und Produktion für Beispiel 1a (oben, aerober Direkteinleiter) und 1b (unten, Direkteinleiter mit anaerober Vorbehandlung)	94
Bild 23: CO_{2e} -Emissionen für Beispiel 1a (oben, aerober Direkteinleiter) und 1b (unten, Direkteinleiter mit anaerober Vorbehandlung)	95
Bild 24: CO_{2e} -Emissionen für Beispiel 2b: Kommunale Kläranlage mit industriellem Indirekteinleiter (nur belüftetes M-A-Becken)	96
Bild 25: CO_{2e} -Emissionen für Beispiel 2c: Kommunale Kläranlage mit industriellem Indirekteinleiter (mit anaerober Vorbehandlung)	97
