

**STADT.
CITY.
VILLE.
BONN.**

Klimaschutz-Teilkonzept Kläranlage Bonn Salierweg

Erläuterungsbericht - Kurzfassung
April 2013 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0147 021



GEFÖRDERT DURCH:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE



**STADT.
CITY.
VILLE.
BONN.**

Klimaschutz-Teilkonzept Kläranlage Bonn Salierweg

Erläuterungsbericht - Kurzfassung
April 2013 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0147 021

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KS2439 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Bearbeitet durch:
Dipl.-Ing. Bernhard Wöffen,
Eric Gramlich, M.Sc.
c: Dr.-Ing. Manja Steinke

Aufgestellt:
Aachen, im April 2013

Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder

Inhaltsverzeichnis, Kurzfassung

1	Veranlassung und Vorbemerkungen.....	1
2	Projektleistungen.....	1
2.1	Darstellung der Ist-Situation.....	1
2.2	Energie- und CO ₂ -Bilanz.....	3
2.2.1	Analyse des Energieverbrauchs laut Angaben der Stromabrechnung	3
2.2.2	Bewertung mit Energiecheck und Energieanalyse nach DWA-A 216.....	4
2.2.3	Klimagase und CO ₂ -Bilanz.....	5
2.3	Potenzialanalyse, Maßnahmenbeschreibung und -bewertung	6
2.3.1	Ergebnisse der bisherigen Energieanalysen (A1-7, B1-16, C4-7, C12).....	7
2.3.2	Geplante Maßnahmen Schlammbehandlung (C1 – 3, C8 – 15, E1 und E2)	7
2.3.3	KVA-Optimierung mit Schlämmen von Königswinter (D1a).....	11
2.3.4	Verbrennungsanlage mit Trocknung und Stromerzeugung (D1b)	11
2.3.5	Cambi-Verfahren, Thermische Hydrolyse vor der Schlammfäulung (S1)	12
2.3.6	Kopftemperatur KVA um 20 °C erhöhen (D2).....	12
2.3.7	Umstellung Abpulssteuerung KVA-Filter (D3).....	12
2.3.8	Bedarfsorientierte Abluftreinigung (S2).....	12
2.3.9	Messung der Methan- und Lachgasemissionen (S7-S8).....	13
2.3.10	Elektromotorencheck (S9).....	13
2.3.11	Straßenbeleuchtung auf dem Kläranlagengelände (S10a).....	14
2.3.12	Gebäudeinnenbeleuchtungen (S10b)	14
2.3.13	Anschluss Nah-/Fernwärmenetz (S11)	15
2.3.14	Photovoltaik (S3).....	15
2.3.15	Wasserkraft (S4)	15
2.3.16	Große Windkraftanlage (S5)	15
2.3.17	Abwasserwärme (S6).....	15
2.3.18	Windkraft, kleine Vertikalwindräder (S12)	16
2.4	Maßnahmenkatalog	16
2.5	Akteursbeteiligung.....	17
2.6	Controlling-Konzept.....	17
2.7	Konzept für die Öffentlichkeitsbeteiligung	17
2.8	Ergebnisse	18
2.8.1	Strom- und Wärmeverbrauchsentwicklung, Kosten und Nutzen.....	18

2.8.2	CO2-Einsparungen	18
2.8.3	Energienachweis.....	18
3	Zusammenfassung.....	19
4	Literatur- und Quellenverzeichnis	20

Bildverzeichnis (siehe Anhang, Kurzfassung Projektpräsentation)

Bild 1:	Titelbild Kurzfassung Projektpräsentation
Bild 2:	Aufgabenstellung nach Auftrag
Bild 3:	Darstellung der Ist-Situation, Datenbasis
Bild 4:	Darstellung der Ist-Situation, Fließbild
Bild 5:	Darstellung der Ist-Situation, Verfahrensschema
Bild 6:	Darstellung der Ist-Situation, Energie
Bild 7:	Darstellung der Ist-Situation, Energieanalyse nach DWA-A 216
Bild 8:	Darstellung der Ist-Situation, Stromverbrauch
Bild 9:	Ist-Situation, Blockschema Kläranlage
Bild 10:	Darstellung der Ist-Situation, Faulgasnutzung
Bild 11:	CO ₂ -Bilanz
Bild 12:	Potenzialanalyse
Bild 13:	17 Sofortmaßnahmen (bis 2013 erledigt)
Bild 14:	13 Kurzfristige Maßnahmen
Bild 15:	14 Abhängige Maßnahmen
Bild 16:	Akteursbeteiligung
Bild 17:	Controlling-Konzept
Bild 18:	Öffentlichkeitsarbeit
Bild 19:	Ergebnisse, Strom, Wärme, Kosten, Nutzen
Bild 20:	Ergebnisse, CO ₂ -Emissionen/-Einsparungen
Bild 21:	Konzept, Blockschema Kläranlage
Bild 22:	Ergebnisse, DWA-A 216 KA/KA+KVA
Bild 23:	Zusammenfassung

1 Veranlassung und Vorbemerkungen

Das Tiefbauamt der Bundesstadt Bonn betreibt im Stadtgebiet die vier Kläranlagen Salierweg, Bad Godesberg, Beuel und Duisdorf.

Das Bundesministerium fördert seit 2011 im Rahmen der „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzkonzepten in sozialen, kulturellen und öffentlichen Einrichtungen“ Klimaschutz-Teilprojekte zum Schwerpunkt „Klimafreundliche Abwasserbehandlung“. Zielstellungen dieses **Klimaschutz-Teilkonzeptes (KSTK)** sind die Entwicklung einer Entscheidungsgrundlage und eines strategischen Planungsinstrumentes mit denen dauerhaft Treibhausemissionen und Energiekosten der Abwasserreinigung gesenkt werden können. Die Untersuchungen für die Kläranlage Bonn Salierweg umfassen sämtliche Verfahrensstufen der Abwasserbehandlung inklusive der Schlammbehandlung, der Klärgasnutzung und der Schlamm Entsorgung einschließlich der Verbrennung.

Details, Quellen, Abkürzungen und weitergehende Informationen sind in der Langfassung des KSTK mit 19 Anlagen und 5 Plänen detailliert beschrieben.

Die Bildnummern beziehen sich auf die im Anhang dieser Kurzfassung beigefügten Bilder der Projektkurzpräsentation.

2 Projektleistungen

Das Klimaschutz-Teilkonzept (= KSTK) für die Kläranlage Bonn Salierweg wurde in den in Bild 2 des Anhangs dargestellten Teilschritten bearbeitet.

Grundlage der Darstellung der Ist-Situation sind die Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen. Als **Basisjahr wurde das Jahr 2009** gewählt (siehe Bild 3), da die Datenbasis für dieses Jahr am vollständigsten in den bisherigen Untersuchungen (z. B. Energieanalyse [1]) ist.

2.1 Darstellung der Ist-Situation

Die Kläranlage Bonn Salierweg ist für **307.000 E** im mechanischen Teil und für **285.000 E** im biologischen Anlagenteil ausgelegt. Die Schlammbehandlung ist für eine Kapazität von **505.000 E ausgelegt**, da die Schlämme von den Kläranlagen Bonn Beuel und Bonn Bad Godesberg in der Faulung und KVA und die ausgefaulten Schlämme aus den Kläranlagen Duisdorf sowie seit 2009 auch Königswinter in der KVA mitbehandelt werden (siehe Bild 5).

Im Jahr 2009 wurde eine aktuelle Belastung des mechanischen und biologischen Teils der Kläranlage von **262.285 E (= EW-Abwasser)** ermittelt [1].

Für die **Schlammbehandlung** wurde eine Belastung von **409.100 E (= EW-Schlamm)** ermittelt.

Für die in der **Klärschlammverbrennungsanlage (= KVA)** ergeben sich **462.579 E (= EW-KVA)**.

Die Kläranlage Bonn Salierweg wurde im Jahr 1934 gebaut. Danach erfolgten mehrere Um- und Ausbauten an der Kläranlage:

1957	Vorreinigung, Faulbehälter,
1989	Reinsauerstoffbiologie und ein neuer Faulbehälter,

1993	Umstellung Belebungsbeckenbelüftung mit Luft,
1981	Klärschlammverbrennungsanlage =KVA,
1985 - 1987	Rauchgasreinigungsanlage, Elektrofilter und Kalksorptionsstufe,
1992 - 1997	Neubau mechanische Reinigung
1995	Faulbehälters 2, 3. Nachklärbecken,
1996	Flockungsfiltrationsanlage,
1995 - 2000	Belebungsbeckens mit 12,5 m Wassertiefe
2002	Faulgas-BHKW 100 kW
2004	4. Nachklärbecken als Rechteckbecken,
2005/2006	Heizkessels 3,9 MW
2006	zentrale Warte auf dem Betriebsgebäude,
2007	Ersatz der Turboverdichter,
2011	Sanierung des Ofenhallendach.

In Bild 4 im Anhang ist das aktuelle Fließbild der Kläranlage Bonn Salierweg mit den wesentlichen Bauteilen der Kläranlage im Lageplan dargestellt.

Die Kläranlage Bonn Salierweg grenzt unmittelbar an ein allgemeines Wohnbaugebiet und ein Mischgebiet nach dem Bebauungsplan. Daher wird die Kläranlage mit hohen Auflagen hinsichtlich Emissions- und Schallschutz betrieben.

Aus diesem Grund sind sämtliche Teile der Vorreinigung und Biologie abgedeckt – die Abluft wird in einer Abluftbehandlungsanlage durch eine chemische Wäsche desodoriert bzw. über das Dach des Maschinenhauses auf dem Belebungsbecken abgeblasen. Die runden Nachklärbecken sind zur Vermeidung von Wassergeräuschen im Ablauf mit Tauchrohren ausgestattet, aus denen der Ablauf der Nachklärbecken unterhalb des Wasserspiegels entnommen wird.

Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Grundstücksfläche hat die Kläranlage Bonn Salierweg als Besonderheit sehr tiefe Belebungsbecken (12,5 m Lufteintragstiefe statt üblicher Tiefen von 5,0 - 6,0 m).

Die gesamten Jahresabwassermengen (rund 17,3 Mio. m³ im Jahr 2009) werden in Zulaufpumpwerk Süd und Nord, Zwischenpumpwerk und Zulaufpumpwerk Filtration zur Sicherstellung des Betriebes auch bei Rheinhochwasser zusammen um rund 15 m gehoben.

Die Kläranlage besteht aus den folgenden wesentlichen Anlagenteilen:

- Mechanische Reinigungsstufe mit Vorpumpwerken, Rechen, Sandfanganlagen, Vor- und Regenklärbecken,
- Biologische Reinigungsstufe mit Zwischenpumpwerk und Nachklärbecken,
- Filtration mit Vorpumpwerk,
- Schlammbehandlung mit Faulbehältern, Nacheindickern, maschinelle Schlammentwässerung,
- Klärschlammverbrennungsanlage (= KVA).

Zusammen werden 209.575 m³/a Schlamm in den Faulbehältern behandelt.

Nach der Entwässerung des ausgefaulten Faulschlammes beträgt die Schlammmenge im Ablauf der Zentrifugen nur noch 22.287 m³/a.

Im Jahr 2009 hat die KVA 24.070 m³/a Schlamm verbrannt und dabei 2.955 t/a Reststoffe erzeugt. Davon waren 2.500 t/a Flugasche und Kesselstaub und 455 t/a Reste der Rauchgasreinigung.

In den Faul- und Nachfaulbehältern wurden im Jahr 2009 3.853.090 m³_N/a Faulgas erzeugt. Dies entspricht einer Rate von rund **468 m³/t oTR**, was als recht hohe spezifische Gasproduktion eingeschätzt werden kann. Nach Energiehandbuch NRW [2] gelten 450 m³/t als Richt- und 475 m³/t als Idealwert.

Das Faulgas wird überwiegend für die Verbrennung des Faulschlammes genutzt.

Ein Teil des Faulgases (6 %) wird in einem Gasmotor (= BHKW) zu Strom und Wärme umgewandelt. Im Jahr 2009 wurden aus 215.249 m³_N/a Faulgas (Primärenergiegehalt = 1.399 MWh/a) im BHKW

- 528.582 kWh/a Strom (elektrischer Wirkungsgrad rund 38 %) und
- 660.669 kWh Wärme (thermischer Wirkungsgrad rund 47 %)

erzeugt.

Konkrete Maßnahmen zur Energieeinsparung und damit zum Klimaschutz im Bereich der Kläranlage wurden aus den Feinanalyseergebnissen in [1], Überlegungen des Betriebspersonals (66-3) und Mitarbeitern der Planungsabteilung (66-1) vom Tiefbauamt der Stadt Bonn in ([3], [4], [5], [6]) sowie aus weiteren Gutachten und Studien ermittelt. Hierzu gehören neben der Studie zur Optimierung der biologischen Stufe unter Einbeziehung der mechanischen Stufe [7] auch die Studien zur Optimierung der Schlammverbrennungsanlage [8], [9] und [10].

Neben dem Betrieb der Kläranlage Salierweg führt das Personal der Kläranlage im Bereich der Maschinen- und EMSR-Technik auch Wartungsaufgaben der Pumpwerke im Stadtgebiet durch. Über das zentrale Leitsystem der Kläranlage Bonn Salierweg werden am Wochenende und nachts auch die anderen Bonner Kläranlagen und die Sonderbauwerke im Kanalnetz überwacht.

2.2 Energie- und CO₂-Bilanz

2.2.1 Analyse des Energieverbrauchs laut Angaben der Stromabrechnung

Die Kenndaten zur Stromproduktion (0,5 GWh/a) und dem Strombezug (laut Angaben der Stromberechnung im Jahr 2009 14,8 GWh/a) sind in Bild 6 im Anhang zusammengestellt. Für die KVA wurden 2009 1,4 GWh Erdgas bezogen.

Wärmebedarf und derzeitige Wärmeerzeugung wurden untersucht und zeigen die weitgehende Bedarfsdeckung durch die Wärmeeigenerzeugung aus Faulgas und Schlammverbrennung.

Dabei bleibt von der Wärme ein ungenutztes Potenzial als Wärmeüberschuss von ca. 7.600 MWh/a. Dieser Wärmeüberschuss wird über eine Kühlung aus Grundwasser abgeleitet.

Die Verteilung des Stromverbrauchs von 15,3 GWh/a auf die Anlagenbereiche der Kläranlage ist in Bild 8 im Anhang dargestellt. Die Biologische Stufe verbraucht mit 6,4 GWh/a den größten Anteil davon, zweitgrößter Verbraucher ist die KVA mit 3,3 GWh/a.

2.2.2 Bewertung mit Energiecheck und Energieanalyse nach DWA-A 216

Energiecheck nach DWA-A 216

Nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [11] soll die Prüfung der energetischen Effizienz der Kläranlage abweichend von der Grobanalyse nach dem Energiehandbuch NRW, durch einen jährlich **wiederholten Energiecheck**, mit den in Bild 7 im Anhang aufgeführten sieben Kennwerten, erfolgen.

Beim Energiecheck werden zur ersten groben Orientierung diese ermittelten Kennwerte mit zugehörigen Häufigkeitsverteilungen der Kennzahlen anderer Kläranlagen verglichen. Liegen die eigenen Kennzahlen zum elektrischen Energieverbrauch im schlechteren Bereich der Häufigkeitsverteilung, weist dies mit großer Wahrscheinlichkeit auf ein energetisches Optimierungspotenzial hin.

Spezifischer Gesamtstromverbrauch

Der aus den Anlagenteilen Abwassertechnik mit EW_{Abw} und Eindicker, Faulbehälter, Schlammbehandlung mit $EW_{Schlamm}$ ermittelte spezifische Stromverbrauch der Kläranlage Bonn Salierweg betrug laut Angaben der Stromabrechnung rund **42,8 kWh/(E-a)**.

Der spezifische Stromverbrauch der KVA kann mit $3.362.541 \text{ kWh/a} / 462.579 \text{ E} = 7,3 \text{ kWh/(E-a)}$ berechnet werden. Für diesen Stromverbrauch liegen keine Vergleichswerte vor.

Spezifischer Stromverbrauch der Belüftung/Belebung

Der spezifische Stromverbrauch für die Belüftung liegt bei **13,9 kWh/(E-a)**. Dieser Stromverbrauch ist Kennwert Nr. 2 nach dem DWA-A 216.

Spezifische Faulgasproduktion

Die spezifische Faulgasproduktion von **26 l/(E-d)** ergibt sich aus erzeugter Faulgasmenge von $3.853.090 \text{ m}^3/\text{a}$ (entsprechend primär 24.650 MWh/a) dividiert durch den Einwohnerwert $EW_{Schlamm} = 409.100 \text{ E}$ auf den Tag umgerechnet.

Die auf die dem Faulbehälter zugeführte organische Trockenmasse (8.225 t/a) bezogene Faulgasproduktion betrug **468 m³/toTR** ($3.853.090 \text{ m}^3/\text{a} / 8.225 \text{ t/a} = 468 \text{ m}^3/\text{t}$).

Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität

Die produzierte Faulgasmenge von $3.853.090 \text{ m}^3/\text{a}$ entspricht bei einem spezifischen Energiegehalt von $6,4 \text{ kWh/m}^3$ (Schätzung nach [1]) einem Primärenergiegehalt von

$$3.853.090 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 6,4 \text{ kWh/m}^3 / 10^3 = 24.660 \text{ MWh/a}.$$

Mit dem BHKW werden mit einem Teil davon 529 MWh/a Strom eigenerzeugt. Der Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität beträgt also $529 / 24.660 = 2,1 \%$.

Eigenversorgungsgrad Elektrizität der Kläranlage

Der Eigenversorgungsgrad Elektrizität der Kläranlage ohne KVA betrug im Jahr 2009

$$0,53 \text{ GWh/a} / 12 \text{ GWh/a} = 4,4 \%$$

Für den Eigenversorgungsgrad einer Kläranlage mit einer Schlammverbrennung liegen keine Vergleichswerte vor.

Der geringe Eigenversorgungsgrad Elektrizität ist durch die Verwendung des Faulgases für die Schlammverbrennung bedingt – bei Kläranlagen ohne Schlammverbrennung kann das Faulgas verstromt und die Wärme für die Faulbehälter- und Gebäudebeheizung verwendet werden.

Spezifischer externer Wärmebezug der Kläranlage und der KVA

Der Eigenversorgungsgrad Wärme der Kläranlage ohne KVA betrug **100 %**.

Der Eigenversorgungsgrad Wärme für die Kläranlage und die KVA betrug wegen des Erdgasbezuges für die Anheizvorgänge der KVA:

$$(25,9 \text{ GWh/a} - 1,36 \text{ GWh/a}) / 25,9 \text{ GWh/a} = \mathbf{95 \%}$$

Der spezifische externe Wärmebezug **für die Kläranlage betrug 0 kWh/(E·a)**, für die **Kläranlage mit KVA** berechnet sich dieser Wert zu:

$$1,36 \text{ GWh/a} \cdot 10^6 / 462.579 \text{ E} = \text{rund } \mathbf{3,0 \text{ kWh/(E·a)}}.$$

Energieanalyse nach DWA-A 216

Nach dem DWA-A 216 [11] wurde ebenfalls neben den Orientierungswerten (= 50-% -Werte) Idealwerte zum spezifischen Gesamtstromverbrauch der Kläranlage (35,6 kWh/(E·a)) mit und ohne KVA sowie zum Stromverbrauch der Belebungsbeckenbelüftung (15,8 kWh/(E·a)) entsprechend den im Anhang des Arbeitsblattes DWA-A 216 im Anhang vorgegebenen Berechnungsvorschriften unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Kläranlage Bonn Salierweg ermittelt.

Die Idealwerte nach dem DWA-A 216 [11] sind abweichend von der Wortbedeutung im Energiehandbuch [2] „**Kennwerte zur Beschreibung eines optimalen Bereiches der Energieeffizienz für ein konkretes Anlagenteil oder die gesamte Abwasseranlage unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Randbedingungen**“. Diese Werte wurden den tatsächlichen Verbrauchswerten gegenübergestellt (Gesamt: 42,8/50,1 kWh/(E·a) und BB-Belüftung 13,9 kWh/(E·a).

Zur Aufdeckung von anlagenteilspezifischen Energieeinsparpotenzialen wurde der tatsächliche spezifische Gesamtstrom- und Wärmeverbrauch auch für einzelne Anlagenteile ermittelt und anlagenteilbezogenen spezifischen Idealwerten gegenübergestellt.

2.2.3 Klimagase und CO₂-Bilanz

Die Treibhausgaswirksamkeit (GWP) der Kläranlage setzt sich aus den prozessbedingten Lachgas- ($\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} = 298 \text{ CO}_2\text{Äq}$) und Methanemissionen ($\text{GWP}_{\text{CH}_4} = 25 \cdot \text{CO}_2\text{Äq}$) und den ressourcenbedingten CO₂-Emissionen für den Erdgas- und Betriebsmittel- und Stromeinkauf sowie Schlammtransporten zusammen.

Das Bild 11 im Anhang zeigt die Ergebnisse der Treibhausgasemissionsberechnungen für die Kläranlage Bonn Salierweg. Die Emissionen zur Strom- und Wärmebereitstellung, für den Einsatz von Fäll- und Flockungsmitteln und die Schlammtransporte betragen ca. 12.000 t CO_{2,Äq}/a. Den größten Anteil bildet der Strombezug mit ca. 8.300 t CO_{2,Äq}/a.

Die prozessbedingten Emissionen wurden auf der Grundlage von Forschungsergebnissen abgeschätzt. Der Schwankungsbereich für Lachgas und Methanemissionen liegt bei ca. 4.500 bis 10.300 t CO_{2,Äq}/a. Die Gesamtemission liegt demnach in einem Bereich von 16.500 bis 22.300 t CO_{2,Äq}/a.

Derzeit sind nur wenige Vergleichswerte für CO_{2,Äq}-Emissionen von Kläranlagen vorhanden. In einer Bilanzierung von Bolle et al. [12] wurden die Kläranlagen von zwei Wasserverbänden bewertet. Die spezifischen CO₂-Emissionen lagen bei **62 kg CO_{2,Äq}/(E·a)** und bei **56 kg CO_{2,Äq}/(E·a)**.

Für die Kläranlage Salierweg ergeben sich spezifische Emissionen von ca. 52,8 bis 71,4 kg CO_{2,Äq}/(E·a).

2.3 Potenzialanalyse, Maßnahmenbeschreibung und -bewertung

Die Maßnahmendarstellung erfolgte entsprechend der Klassifizierung der Maßnahmen in der von der Stadt Bonn vorgegebenen Systematik:

Ergebnisse der bisherigen Energieanalysen	Kap. 2.3.1	(A1-7, B1-16, C4-7)
Konzept der geplanten Maßnahmen, Schlammbehandlung und Faulgasnutzung	Kap. 2.3.2	(C1-3 , C8-15, E1-2)
Maßnahmen zur Schlamm Trocknung und Optimierung Schlammverbrennungsanlage	Kap. 2.3.3-7	(D1a/1b, S1, D2-3)
Weitere Maßnahmen im Außenbereich, Beleuchtung und Abluftbehandlung	Kap. 2.3.8-13	(S2, S7-11)
Nutzung erneuerbarer Energien	Kap. 2.3.14-18	(S3-6, S12)

Die Nummerierung erfolgte entsprechend der mit der Angebotsanfrage vorgelegten Gliederung, wobei mit

Axx	Optimierungen mechanische Stufe,	Dxx	Optimierungen KVA
Bxx	Optimierungen biologische Stufe,	Exx	sonstige Klimaschutzmaßnahmen,
Cxx	Optimierungen Schlammbehandlung,	Sxx	Nutzung erneuerbarer Energien,

bezeichnet werden.

Allgemein erfolgten die Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach den in [1] und [7] erfolgten Bewertungen.

Als Strompreis im Betrachtungszeitraum 2009 bis 2024 (25 Jahre, mittlere Dauer der Investitionen) wurden **15,6 Cent/kWh**, das heißt, Strompreis 2009 + 20 % = 13,0 Cent/kWh + 20 % prognostiziert und für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen genutzt. Das entspricht einer jährlichen Strompreissteigerung von 2,43 %/a.

Die Maßnahmen wurden jeweils in sofort-, kurzfristige- (Ausführungszeitraum 5 Jahre) und abhängige Maßnahmen (Ausführungszeitraum 15 Jahre) gruppiert. Abhängige Maßnahmen erfordern vor

der Ausführung eine umfangreichere Planung und sind teilweise nur in Abhängigkeit von ohnehin erforderlichen Ersatzinvestitionen wirtschaftlich.

2.3.1 Ergebnisse der bisherigen Energieanalysen (A1-7, B1-16, C4-7, C12)

Potenziale der von WiW vorgeschlagenen Maßnahmen (A1-7, B3-5, B11-16, C4+7, C12)

Die Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH (WiW) erarbeitete 2010 die „Energiestudie für die Kläranlage Bonn Salierweg“ [1].

Zusammen wurde für die Sofort-, Kurzfristigen- und Abhängigen Maßnahmen in [1] ein Stromeinsparpotenzial von 1.802.431 kWh/a entsprechend 1.015 t CO₂/a aufgezeigt. Dazu müssten Investitionskosten von rund 654.000 € aufgebracht werden.

Das Energieeinsparungspotenzial beträgt 215.409 kWh/a entsprechend 121 t CO₂/a.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis auf der Basis der Kapitalkosten aus den Investitionen im Verhältnis zu den jährlichen Stromeinsparungen der jeweiligen Maßnahmen betrug nach [1], Seite 70 für

- die Sofortmaßnahmen **0,02,**
- die kurzfristigen Maßnahmen **0,12** und
- die abhängigen Maßnahmen ohne A4-A6 **0,25.**

Potenziale der von IWN vorgeschlagenen Maßnahmen (A2-7, B1-10, B12-13, S3-4)

In der Studie der IWN (Ingenieurbüro für Abwasser- und Schlammbehandlung) [7] wurden neben der verfahrenstechnischen Optimierung der biologischen Stufe auch weitere Potenziale zur Energieeinsparung aufgezeigt.

In der Summe weisen die in [7] dargestellten Maßnahmen, ohne schon anderweitig aufgeführte und unwirtschaftliche Maßnahmen, Kosten von 796.800 € entsprechend 114.000 €/a und Energieeinsparungen von 720.945 kWh/a entsprechend 146.900 €/a auf.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt damit für die Summe der Maßnahmen **0,77**. Die Maßnahmen sind damit wirtschaftlich.

2.3.2 Geplante Maßnahmen Schlammbehandlung (C1 – 3, C8 – 15, E1 und E2)

Die nachfolgend mit C1 - C3 sowie C11 benannten Maßnahmen sind nur kombiniert zu werten, da die positiven betrieblichen und energetischen Auswirkungen nur in der Kombination dieser vier Maßnahmen auftreten.

- Optimierung Schlammablass Vorklärung Nord (C1)
- Primärschlammförderung direkt in die Faulbehältervorlage (C2),
- TS □Messung für Erfassung Primärschlamm und Regelung auf Minimal-TS-Wert (C3)
- Optimierung der zeitlichen Abstimmung der Beschickung Eindicker durch die Schlämme von den Kläranlagen Bonn □ Beuel und Bonn □ Bad Godesberg (C11)

Die geschätzte Stromersparnis kann mit 30.000 kWh, 4.700 €/a, abgeschätzt werden.

Die erforderlichen Investitionskosten wurden ohne notwendige Ersatzinvestitionen zu rund 30.000 € (Zulauf-TS zum Primärschlammumpensumpf) geschätzt.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis für diese Maßnahme beträgt **0,74**.

Optimierung der Faulbehälterumwälzeinrichtungen Gaseinpressung, Umwälzpumpen (C8)

Die Faulbehälterumwälzungsoptimierung wurde durch Anschaffung neuer Gaskompressoren und intermittierendem Betrieb der Gaseinpressung für den Faulbehälter 2 und der Umwälzung für Faulbehälter 1 bereits realisiert.

Die Energieeinsparungen wurden in der prognostizierten Höhe von 186.150 kWh/a entsprechend der Einsparungen von 17 t CO₂/a auch realisiert. Dies wurde durch die vorhandenen Strommessungen im Prozessleitsystem bestätigt.

Siebbänder für die Eindickung Überschussschlamm evtl. Umsetzung in Richtung Faulbehälter bzw. Optimierung Eindickgrad (C9)

Die Siebbänder (Fabrikat Huber) wurden vom Betrieb so umgebaut, dass der TR-Austrag regelbar wird. Mehr als 5 % TR ist nicht pumpfähig.

Die Energieeinsparungen und Kosten sind vernachlässigbar. Die Verbesserung betrifft mehr betriebliche Belange, das heißt, der TS-Gehalt der Siebbänder ist konstanter und führt zu weniger Pumpproblemen.

Optimierung Flockmitteleinsatz, Verbesserung der Absetzeigenschaften im Eindicker (C10)

Die Zugabe von Flockmitteln befindet sich derzeit in der Erprobung, damit ein den Schlammeigenschaften angepasster Flockmitteltyp zur Verringerung des Flockmittelverbrauchs gefunden werden kann. Es handelt sich bei der vom Betrieb angeführten Maßnahme um eine betriebliche Verbesserung. Die Energieeinsparungen und Energiekosten der Maßnahme sind vernachlässigbar.

Die Optimierung liegt in der betrieblichen Verbesserung und der sparsamen Verwendung teurer und CO₂-schädlich produzierter Flockmittel.

Optimierung Schlammförderpumpen zur Kläranlage Bonn Salierweg von der Kläranlage Bonn Bad Godesberg und Bonn Beuel (C12)

Die Optimierung der Schlammförderpumpen in Bad Godesberg und Beuel wird durch eine Erhöhung der möglichen TR-Gehalte der Schlämme erreicht. Entsprechende Planungen bei der Neubeschaffung der Pumpen werden derzeit eingeleitet.

Bei TR = 3,5 % statt derzeit 2,8 % müssten statt 153.073 m³/a nur noch 4.287 / 3,5 % = 122.500 m³/a gefördert werden. Dadurch können die Fördermengen und die Oberflächenbeschickung des Voreindickers um 20 % reduziert werden. Die Oberflächenbeschickung des Voreindickers beträgt dann nur noch 45 statt 56 kg TR/(m² · d).

Durch den höheren Feststoffgehalt wird der Vorteil der geringeren Fördermengen und damit geringeren Reibungsverluste jedoch fast wieder aufgezehrt, das heißt, die erforderlichen Pumpenleistungen bleiben in etwa gleich.

Optimierung Schlammabzug Eindicker in Richtung Faulbehälter über Grundablassschieber (C13)

Der Schlammablass aus dem Voreindicker in Richtung Frischschlamm-schacht am Faulbehälter (C13) ist bereits jetzt möglich. Damit kann der Pumpenstrom der 27,3 kW-Pumpen für die Förderung des Schlammes aus dem Voreindicker in den Faulbehältervorlageschacht eingespart werden. Nach den Optimierungsmaßnahmen C2 und C12 würden noch 122.500 m³/a in den Vorlageschacht zur fördern sein. Für die rund $122.500 / 108 = 1.134$ h/a Restförderdauer wäre die Stromersparnis mit $1.134 \text{ h/a} \cdot 20 \text{ kW} = \text{rund } 23.000 \text{ kWh/a}$, 3.600 €/a anzunehmen. Für eine Schieberverriegelung gegen Überfüllung der Schlammvorlage am Faulbehälter werden als Kosten rund 2.500 €, 300 €/a angenommen.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis ist damit $300 / 3.600 = 0,08$: Die Klimawirksamkeit dieser Maßnahme beträgt 13 t CO₂/a.

Bauliche Ergänzung zur Optimierung Eindickerbetrieb - Abzug Trübwasser (C14)

Durch die Maßnahme C14 soll der ursprünglich im Eindicker vorhandene Trübwasserabzug reaktiviert/erneuert werden.

Es handelt sich bei der vom Betrieb angeführten Maßnahme um eine betriebliche Verbesserung.

Die Energieeinsparungen der Maßnahme sind vernachlässigbar, da die Vorteile der höheren Aufenthaltszeiten im Faulbehälter bei besserer Eindickung oder ein erhöhter Gasanfall durch die längere Faulbehälteraufenthaltszeit geringfügig sind und im Ungenauigkeitsbereich der übrigen Maßnahmen enthalten sind.

Die Kosten der Maßnahme sind vernachlässigbar, da diese als betriebliche Ersatzinvestition eines abgeschriebenen Trübwasserabzugs und nicht als Klimaschutz-Maßnahme zu werten ist.

Optimierung Zentrifugen, Flockmitteleinsatz und Ersatz Zentrifugen (C15)

Als Maßnahme C15 soll der Ersatz der vorhandenen Zentrifugen durch eine neue Zentrifugen Generation mit besserem Entwässerungsgrad und geringerem Stromverbrauch bewertet werden.

Das Stromeinsparpotenzial, unmittelbar bei der Entwässerung, wird zu rund 180.000 kWh/a, 28.100 €/a abgeschätzt.

Die Nutzenberechnung des Zentrifugen Ersatzes bewertet aber auch den Nutzen aus dem höheren Schlamm-TS-Gehalt und damit der Reduzierung des Schlamm-trocknungs- und Verbrennungsaufwandes. Bei sehr niedrig geschätzten Kosten von 100 €/m³ für die Schlammverbrennung und Ascheentsorgung sind die Einsparungen in diesem Bereich mit rund 520.000 €/a deutlich höher als die bei der Entwässerung direkt eingesparte Energie von 180.000 kWh/a, also 28.100 €/a.

Zudem werden durch diese Maßnahme 101 t CO₂/a eingespart.

Klimaanlage in der Warte Belebungsbecken, Standort Schaltschrank Überprüfung aller Klimageräte auf der Kläranlage (E1)

Auf der Kläranlage befindet sich sowohl auf dem Betriebsgebäude 1 als auch in der Verbrennungsanlage jeweils eine zentrale Kompressionskälteanlage zur Raum- und Schaltschrankkühlung. Zudem sind an einigen dezentralen Standorten z. B. im Labor und Besprechungsraum und an Schaltschränken im Betriebsgebäude 3 und in der Warte Belebung kleinere Kühlaggregate als sogenannte Split-Geräte im Einsatz.

Für die Kühlung von Schaltschrankräumen sowie von Warten- und Besprechungsräumen, kann bei günstigen Anschlussbedingungen an das Heizleitungsnetz, der Einsatz von **Adsorptionskälteaggregaten** statt der üblichen in der Regel stromgeführten Kompressionskälteerzeuger wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft zur Gewinnung von Kälte aus Wärme genutzt werden.

Die Gesamtkostenersparnis für die Energie beträgt bei 150 kW-Leistung in Adsorptionskälteanlage 105.300 €/a.

Bei 350.000 € Investitionskosten fallen 38.400 €/a Kapitalkosten und 11.400 €/a für Reparaturen und Wartung, das heißt 49.800 €/a Jahreskosten an. Das Kosten-/Nutzenverhältnis ist **0,47**.

Es würden **105 t CO₂/a** Klimagasemissionen durch Stromeinsparung (126 t CO₂/a) unter Berücksichtigung des zusätzlichen Wärmeverbrauchs (-21 t CO₂/a) eingespart.

Heizungsanlage Überprüfung Betrieb (E2)

Für den Verkauf innerhalb der EU müssen Heizungsumwälzpumpen nach der EU-Richtlinie für energieverbrauchende Geräte (EuP-Richtlinie, EG 641/2009) eine Mindesteffizienz haben, die in Form eines Energie-Effizienz-Indexes (EEI) definiert ist. Der EEI darf ab 01.01.2013 maximal 0,27 betragen.

Beim Ersatz von 5 kW alten EEI 0,46 durch geregelte und effizientere EEI 0,23 Heizungsumwälzpumpen würden nur noch 21.900 kWh/a Strom benötigt werden. Dadurch würden je 5 kW Heizungsumwälzpumpenleistungersatz rund 22 MWh/a Strom und 12 t CO₂/a eingespart.

Zur Reduzierung der Verluste an den Heizleitungen und Armaturen müssen die Wärmeisolierungen entsprechend den Vorgaben der derzeit geltenden Energie-Einsparverordnung (= EnEV 2007/2009 [13]) gegebenenfalls geprüft und ergänzt werden. Die Gesamtmehrkosten werden, da die Armaturen am Heizverteiler im Faulbehälterkeller weitgehend isoliert sind, mit nur 25.000 € abgeschätzt. Als Nutzen wird eine Einsparung von ca. 30 MWh/a im Wärmebereich abgeschätzt.

Zusammen würden für die 25.000 € Investitionskosten 2.900 €/a Kapitalkosten anfallen.

Dem stehen 22 MWh/a und 3.400 €/a Stromeinsparungen sowie 12 t CO₂/a Emissionseinsparungen für die ersetzte Heizungsumwälzpumpenleistung und bei 30 MWh/a (1.800 €/a) Wärmeenergieeinsparung aus zusätzlichen Isolierungen zusammen 5.200 €/a Strom- und Wärmeeinsparung gegenüber.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis ist **0,56**.

2.3.3 KVA-Optimierung mit Schlämmen von Königswinter (D1a)

Durch die zusätzliche Schlammaufnahme der Schlämme von Königswinter wurde eine bessere Auslastung der KVA erreicht. Diese Verbrennungsanlagenoptimierung (Maßnahme D1a) erhöht die Jahresfracht der KVA um rd. 475 t TR auf 6.102 t TR/a.

Bei der Kapazität einer der beiden Verbrennungsstraßen der KVA von je 1 t TS/h können bei 8.000 h/a Betriebszeit und 760 h/a Wartung und Revisionen 8.000 t TS/h mit einer Linie verarbeitet werden. Für die o. a. Schlammengen von 6.102 t TS/a ist also der Betrieb einer Linie ausreichend.

Für die Verbrennung, der im Jahr 2003 verbrannten Schlammengen wurden 25.612 MWh/a Faul- und Erdgas genutzt.

Die Maßnahme D1a dient der besseren Auslastung der Verbrennungsanlage. Kosten-/Nutzen Analyse und Klimagaseinsparungen sind vernachlässigbar, da hier lediglich eine Verschiebung von Königswinter zur KA Salierweg stattfindet.

2.3.4 Verbrennungsanlage mit Trocknung und Stromerzeugung (D1b)

Die derzeitige Faulgasnutzung des bei der Faulung anfallenden 3.853.090 m³_N/a Faulgases erfolgt überwiegend als Stützfeuerung für die Schlammverbrennung (siehe Bild 10 des Anhangs).

Als Alternative zur derzeitigen Nutzung des Faulgases wäre auch eine vollständige Nutzung des anfallenden Faulgases durch eine BHKW-Anlage möglich.

Die Optimierung der Verbrennungsanlagen mit Vorschaltung einer Trocknung und selbstgängiger Verbrennung ist in **Variante 4** der Studie „Zukunftssicherung der KVA Bonn“ [8] aufgezeigt:

1. Selbstgängige Verbrennung, TR-Gehalt wird durch geeignete Trocknungseinrichtungen soweit erhöht (> 42 %, [8], Seite 37, 45 %, [9], Seite 4), dass eine selbstgängige Verbrennung möglich ist. Die überschüssige, nicht mehr benötigte Faulgasmenge wird in einem zusätzlichen, größeren BHKW verstromt.
2. Die derzeitige Enthärtung bzw. Teilentsalzung des Zusatzwassers wird durch eine Vollentsalzung ersetzt, die die erforderliche Salzfreiheit für den Betrieb von Dampfmaschinen (und Dampfturbinen) sicherstellt. Weiterhin wird ein Speisewasserbehälter mit thermischem Entgaser installiert, um eine ausreichende Entgasung zu gewährleisten ohne bzw. bei minimalem Einsatz von zusätzlichen Sauerstoffbindemitteln.
3. Die Faulgasnutzung des durch die Trocknung in der KVA nicht mehr benötigten Faulgases soll über eine BHKW-Anlage mit zwei Modulen je 525 kW elektrischer Klemmenleistung erfolgen.

Die Investitionskosten für diese Umstellung werden in Anlage 9.8 [9] mit 4.570.000 € angegeben.

Die Wärmeenergie für den Trockner könnte weitgehend aus BHKW- und Schlammverbrennungsanlagenabwärme bereitgestellt werden.

Dadurch würde der Eigenerzeugungsgrad Strom für die Kläranlage Bonn Salierweg erhöht und ein höherer Anteil des Faulgases zur kombinierten Strom- (+ 8.000 MWh/a + 500 MWh altes BHKW)

und Wärmeerzeugung genutzt werden. Die derzeit notwendige Kühlung würde deutlich reduziert, da die Abwärme der BHKWs und Schlammverbrennung für die Schlamm Trocknung genutzt würde.

Als Strommehrbedarf ist für die Trocknung rund 1.000 MWh/a ([9], Anlage 9.6) gegenüber der derzeitigen Betriebsweise (Variante 1) zu veranschlagen.

2.3.5 Cambi-Verfahren, Thermische Hydrolyse vor der Schlammfäulung (S1)

Als weitere Maßnahme zur Energieeinsparung mit gleichzeitiger Erhöhung der Eigenstrom- und Wärmebedarfsdeckung wird eine thermische Hydrolyse vor der Schlammfäulung (Cambi-Verfahren [14]) vorgeschlagen.

Bei diesem Verfahren würde ein Anteil von rund 221.000 m³/a (Überschussschlamm Salierweg und Mischschlamm + Beuel/Bad Godesberg) auf 16,5 % TS entwässert (rd. 50.000 m³/a) durch eine thermische Hydrolyse besser für die Fäulung nutzbar gemacht (rd. 10 % Mehrgasertrag).

Die Investitionskosten der Anlage werden zu etwa 2.500.000 € einschließlich einer Halle inklusive Vorentwässerung (Richtpreis Firma Cambi) abgeschätzt. Die Jahreskosten ergeben sich zu etwa 566.000 €/a. Der Nutzen infolge der Einsparungen bei der Schlamm entsorgung und der zusätzlichen Faulgasnutzung ergeben sich zu ca. 629.000 €/a. Das Kosten-/Nutzenverhältnis ist **0,9**.

Die erzeugte Strommenge ist 900 MWh/a höher; zusätzlich werden 409 t CO₂/a vermieden.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass vor Realisierung dieser Maßnahme S1 eine umfangreiche Voruntersuchung der Randbedingungen des Cambi-Verfahrens mit dem Bonner Überschussschlamm erforderlich ist.

2.3.6 Kopftemperatur KVA um 20 °C erhöhen (D2)

Durch die Erhöhung der Kopftemperatur, der KVA um 20 °C, wurde eine Verbesserung der Abgasqualität erreicht. Eine Untersuchung durch das Kläranlagenpersonal ergab geringere Lachgasemissionen (Klimagasreduktion) und einen besseren Ausbrand. Die energetischen Auswirkungen dieser Maßnahme sind vernachlässigbar gering.

2.3.7 Umstellung Abpulssteuerung KVA-Filter (D3)

Die Abpulssteuerung der KVA-Filter wurde durch einen intermittierenden Betrieb so modifiziert, dass die Filterreinigung von Hand reduziert werden konnte. Diese Maßnahme hat keinen messbaren energetischen Vorteil, sondern stellt eine verfahrenstechnische Verbesserung dar, die durch bessere Filterreinigung die Gefahr von Filterdurchbrüchen mit Abgas-Emissionsgrenzwertüberschreitungen reduziert.

2.3.8 Bedarfsorientierte Abluftreinigung (S2)

Der Abluftabzug und die Abluftreinigung könnte in den Bereichen Sandfang, Vorklärbecken und der Eindickseihbänder über eine CO₂-Messung (alternativ CH₄), überlagert mit einem Zeitprogramm, bedarfsorientiert reduziert werden. Hier müssten allerdings sensible Voruntersuchungen der dann auftretenden Geruchsemissionen durchgeführt und genehmigungsrechtlich abgeklärt werden.

Für die weiter von der zentralen Abluftreinigungsanlage entfernten Bereiche (Faulung) würde ein Luftwäscherersatz durch dezentrale Anlagen die Energiekosten senken. Dafür könnten z. B. Photoionisations- oder Aktivsauerstoffverfahren zum Einsatz kommen.

Als Einsparpotenzial wird die Abschaltung an rund 20 % der Betriebszeiten angenommen. Bei einem Strombedarf der abschaltbaren Abluftwäscher von rund 1.030.000 kWh/a ergibt sich damit ein Einsparpotenzial von rund 206.000 kWh/a, 32.100 €/a. Die entsprechende CO₂-Einsparung beträgt 116 t CO₂/a.

Die Kosten für diese Maßnahme werden auf rund 250.000 €; 35.600 €/a Kapitalkosten, geschätzt.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt damit **1,1**. Die Maßnahme ist damit derzeit noch nicht wirtschaftlich, kann aber bei zukünftig nur 10 % Strompreissteigerung wirtschaftlich werden.

2.3.9 Messung der Methan- und Lachgasemissionen (S7-S8)

Die voraussichtlichen Methangas- und Lachgasemissionen sind wegen der

- Unsicherheiten der Übertragbarkeit bisheriger Messungen,
- der hohen spezifischen Treibhausgaswirksamkeit (GWP 25 bzw. 298-fach höher als CO₂),
- des relativ hohen Anteils an den Treibhausgasemissionen der Kläranlage sowie
- der Entscheidungsfindung, ob eine Nutzung des CH₄ wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll wäre,

zur Absicherung und zum Nachweis der Klimagasemissionen aus der Kläranlage von hohem Interesse. Messprogramme zur Bestimmung der tatsächlichen Emissionen sind daher zu empfehlen.

2.3.10 Elektromotorencheck (S9)

Die meisten elektrischen Energieverbraucher der Kläranlage sind Elektromotoren der unterschiedlichsten Leistungs- und Energieeffizienzklassen. Bei Austausch der Motoren (Ersatzinvestitionen) ist darauf zu achten, dass neubeschaffte Motoren mindestens die Effizienzklasse IE2, besser aber IE3 haben, da die Effizienzklasse IE2 für neue Motoren ab 2012 nach EU-VO [15] als Mindeststandard vorgeschrieben ist. Es wird daher ein Elektromotorencheck empfohlen.

Für Elektroantriebe mit einer beispielhaften Leistungsaufnahme von zusammen 100 kW, die als Dauerläufer betrieben werden, werden 870 MWh/a Strom verbraucht. Würde diese Elektromotorenkapazität von bisher IE1-Motoren durch effizientere IE3-Motoren ersetzt, läge das Einsparpotenzial bei 2 - 3 % von 0,87 GWh/a, also bei 18 bis 27 MWh/a.

Der Mehrpreis beim Ersatz von defekten Elektromotoren mit der Effizienzklasse IE3 statt IE1 beträgt je 100 kW Motorenleistung weniger als 5.000 €. Daraus resultieren zusätzliche Kapitalkosten gegenüber Standardmotoren von 700 €/a, die bei nur 2 % Einsparpotenzial, das heißt, 18 MWh/a (100 kW) entsprechend rund 2.800 €/a Stromkosten einsparen.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt **0,25**.

Die CO₂-Ersparnis beim Ersatz von dauernd laufenden IE1-Standardmotoren gegenüber effizienteren IE3-Motoren beträgt je 100 kW ersetzter Motorenleistung mindestens 10 t CO₂/a. und wäre beim Ersatz von älteren EFF3-Motoren noch höher.

2.3.11 Straßenbeleuchtung auf dem Kläranlagengelände (S10a)

Derzeit sind in der Kläranlage Bonn Salierweg im Außenbereich Quecksilber-Hochdruckentladungslampen, wie bei den meisten Straßenleuchten in Europa installiert. Leuchtdioden (LEDs) sind bereits heute energieeffizienter als Glühlampen und Quecksilber-Hochdruckentladungslampen. Sie besitzen eine längere Lebensdauer und eine höhere Lichtausbeute bei niedriger Temperatur.

Die Ausleuchtung der Straßen mittels moderner LED-Technologie wird in Form von Pilotprojekten bereits in einzelnen Städten Deutschlands getestet (z. B. Bonn [16]; Düsseldorf [17]; Bielefeld [18]; Magdeburg, Ilvesheim und Rheinbach in [19]).

Für die Außenbeleuchtung sollte mittelfristig eine Umrüstung auf LED-Beleuchtung eingeplant werden, da preiswerte Umrüstsätze dann voraussichtlich zur Verfügung stehen.

Der Nutzen ergibt sich aus der Energieersparnis und aus der Ersparnis durch weniger Leuchtmittelaustauscherfordernisse von zu ca. 5.680 €/a. Die Kosten für 30 Außenleuchten wären mit rund 30.000 € entsprechend 4.300 €/a zu veranschlagen.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt für die LED-Umrüstung bei Notwendigkeit einer Neuanschaffung der Außenbeleuchtung **0,75**. Die Maßnahme ist damit wirtschaftlich.

Durch das BMU-Förderprogramm für Außenbeleuchtungen mit LED [20] lässt sich das Kosten-/Nutzenverhältnis noch weiter verbessern.

2.3.12 Gebäudeinnenbeleuchtungen (S10b)

Mittelfristig ist auch eine Umrüstung der Gebäudebeleuchtung für die Betriebsgebäude der Kläranlage auf LED-Beleuchtung anzustreben.

Geschätzte Kosten bei rund 200 Leuchten derzeit 18 - 36 W je 50 €: 10.000 €, 1.200 €/a.

Geschätzter Nutzen: Halbierung des derzeitigen Stromverbrauchs der Beleuchtung

$2.000 \text{ h/a} \cdot 200 \text{ Stück} \cdot 0,03 \text{ kW/Stück} / 2 = 12.000 \text{ kWh/a} / 2$, rund 1.900 €/a.

Wegen der längeren Lebensdauer von LEDs ist beim Leuchtmittelaustausch und beim Aufwand für den Leuchtmittelaustausch eine zusätzliche Ersparnis von rund 250 €/a zu erwarten. Der Gesamtnutzen erhöht sich damit für die LED-Umrüstung auf 1.900 €/a + 250 €/a = 2.150 €/a.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt für die LED-Umrüstung bei Notwendigkeit einer Neuanschaffung der Gebäudebeleuchtung **0,56**.

Die CO₂-Ersparnis für die Maßnahmen S10a und b beträgt 17 t CO₂/a.

2.3.13 Anschluss Nah-/Fernwärmenetz (S11)

Wegen des vor allem im Sommer anfallenden Wärmeüberschusses, der durch die erforderliche Notkühlung des BHKW-Rücklaufs Energie verbraucht, ist eine Einspeisung in ein Fernwärmenetz denkbar, in dem diese Energie möglicherweise für die Nutzung für Absorberkühleinrichtungen genutzt werden kann. Wegen der fehlenden Abnehmer und der zu erwartenden recht geringen Wärmeerlöse wird diese Option (Anschluss an Nah-/Fernwärmenetz) für die Kläranlage Bonn Salierweg nicht empfohlen.

2.3.14 Photovoltaik (S3)

Zur Nutzung der Photovoltaik auf den Bonner Kläranlagen wurden bereits Voruntersuchungen durchgeführt [21], [22]. Im Ergebnis sind nach [21] auf der Kläranlage Bonn Salierweg rund $115 \text{ kW}_{\text{peak}}$, verteilt auf den Dachflächen der Mechanik Nord, dem Lager der Biologie und dem Betriebsgebäude Biologie möglich und technisch sinnvoll. Daraus könnte eine Stromerzeugung von $115 \text{ kW}_{\text{peak}} \cdot 860 \text{ kWh/a} = 98.900 \text{ kWh/a}$ Strom mit einer Strompreiseinsparung von 15.400 €/a generiert werden.

Diese Stromerzeugung ist für den Eigenverbrauch bei spezifischen Stromkosten von $15,6 \text{ Cent/kWh}$ dann wirtschaftlich, wenn die PV-Module weniger als $1.990 \text{ €/kW}_{\text{peak}}$ kosten. Die derzeitigen Modulpreise für Anlagen unter $100 \text{ kW}_{\text{peak}}$ sind nach Marktuntersuchungen derzeit geringer. Eine Nutzung des EEG muss daher nicht berücksichtigt werden und ist wegen der ohnehin bereits geringeren EEG-Vergütung nicht wirtschaftlicher. Es ist davon auszugehen, dass eine derartige Investition zur Eigennutzung des PV-Stroms wegen der derzeit noch fallenden Modulpreise und steigenden Strompreise zukünftig noch wirtschaftlicher wird.

Die Eigennutzung des Stroms aus der Photovoltaik für die Kläranlage ist bei Wirtschaftlichkeit möglich und auch Gebührenkonform, da keine Einkünfte erzielt werden und die Gründung einer eigenen Gesellschaft (Gewinnerzielung) nicht erforderlich wird.

2.3.15 Wasserkraft (S4)

Zur Wasserkraftnutzung wird auf die Maßnahme S4 [7] verwiesen. Darin ist die Wasserkraft am Ablauf der Filtration von IWN vorgeschlagen. Der Vorschlag der Wasserkraftnutzung am Ablauf der Filtration zum Rhein wurde schon in einer Begehung mit Fachleuten der Stadtwerke untersucht. Aufgrund der örtlichen baulichen Gegebenheiten besteht nach Auffassung dieser Fachleute keine Realisierungsmöglichkeit für die Wasserkraftnutzung am Ablauf der Filtration (siehe auch Punkt 14 der übergebenen Unterlagen in Kapitel 1, Neumann-Studie).

2.3.16 Große Windkraftanlage (S5)

Der Bau einer großen Windkraftanlage mit 2 MW Leistung oder mehr ist auf dem Kläranlagengeände aus genehmigungsrechtlichen Gründen wegen der Nähe zur Wohnbebauung nicht möglich.

2.3.17 Abwasserwärme (S6)

Die Umwandlung der Wärme aus dem Abwasser erfolgt mittels moderner Wärmepumpen in Kombination mit Wärmetauschern. Das Wärme-Potenzial der Kläranlage Bonn Salierweg beträgt ausgehend von einer Nutzung im Ablauf der Kläranlage

($Q = 17.343.316 \text{ m}^3/\text{a}$, $1.980 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{TW}} = 3.744 \text{ m}^3/\text{h}$) bei einer Temperaturspreizung von $2 \text{ }^\circ\text{C}$ im Ablaufwasser und unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmekapazität des Abwassers von:

$$1,16 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}): 1.980 \cdot 1,16 \cdot 2 = 4.605 \text{ kW.}$$

Pro Jahr könnten damit 40,3 GWh Wärme auf Niedrigtemperaturniveau erzeugt werden.

Nimmt man den Wärmeleistungsbedarf von Einfamilienhäusern mit 20 kW im Winter an, könnten damit $4.605 / 20 = 230$ Einfamilienhäuser beheizt werden.

Es besteht am Standort Salierweg bereits ein Überangebot an Wärme. Nach Untersuchungen der Stadtwerke Bonn (Besprechungsvermerk vom 10.12.2010) ist die Abwasserwärme jedoch nicht wirtschaftlich nutzbar.

2.3.18 Windkraft, kleine Vertikalwindräder (S12)

Denkbar wäre auf dem Kläranlagengelände die Installation von mehreren kleinen Windkraftanlagen mit vertikaler Welle, weil dabei kein Schattenwurf auftritt. Bei 16 Stück Vertikalachsen-Windgeneratoren (z. B. Twister-5000-T, Nennleistung je Stück 5 kW, zusammen 80 kW Windkraftleistung) würde der Windstromertrag bei 1.800 Volllaststunden für diese 16 Anlagen 144.000 kWh/a, 23.500 €/a betragen.

Die Klimagaseinsparung würden 81 t CO₂/a für den regenerativ erzeugten Strom betragen.

Für die Kosten werden 480.000 € Gesamtinvestitionskosten, also 56.300 €/a veranschlagt. Die Betriebskosten für Wartung und Reparaturen, Versicherungen und Sonstigem betragen rund 3.700 €/a.

Es stehen damit Jahreskosten von rund 60.000 €/a einem möglichen Stromertrag von 23.500 €/a (100 % Eigennutzung 15,6 Cent/kWh statt 9,41 Cent/kWh EEG) gegenüber.

Das Kosten-/Nutzenverhältnis beträgt **2,42** – derartige Kleinwindanlagen sind derzeit (noch) unwirtschaftlich.

2.4 Maßnahmenkatalog

Alle erarbeiteten Maßnahmenvorschläge

- führen nicht zu einer Verminderung der Reinigungsleistung und
- gefährden nicht die Sicherheit und den Betrieb der Anlage.

Der von der Stadt Bonn im Zuge der Auftragserteilung übergebene Maßnahmenkatalog wurde im Zuge der Bearbeitung vom Ersteller der Studie um weitere Maßnahmen erweitert und im Rahmen des Klimaschutz-Teilkonzeptes hinsichtlich der Energieeinsparpotenziale, Investitionskosten, Wirtschaftlichkeit, Kosten-Nutzen-Verhältnis, Machbarkeit, Doppelnennungen und Klimawirksamkeit in t CO₂/a näher untersucht. Alle Maßnahmen, die sich nach Prüfung als unwirtschaftlich, in anderen Maßnahmen enthalten bzw. als nicht erfolgreich bzw. nicht realisierbar erwiesen haben, wurden aus dem noch zu realisierenden Maßnahmenkatalog gestrichen.

Die Maßnahmen wurden neu nach der zeitlichen Reihenfolge der Maßnahmen in Gruppen Sofort-, kurzfristige- und abhängige Maßnahmen dargestellt und summiert dargestellt (siehe Bild 13 bis Bild 15). Die Stadt Bonn setzt nach einem Ratsbeschluss von 2011 bei allen Kläranlagen zertifizierten Grünen Strom („Ökostrom“) ein. Damit wird der Stromverbrauch der Bonner Kläranlagen seit dem Jahr 2011 CO₂-neutral. Zu den bereits durchgeführten bzw. begonnenen Klimaschutzmaßnahmen zählen die dargestellten 17 Sofortmaßnahmen. Dadurch wurden bereits eine Stromersparung von rund 384.000 kWh/a sowie betriebliche Verbesserungen erzielt.

Bild 14 zeigt Investitionskosten, Stromeinsparpotenziale bzw. Eigenstromerzeugung (roter Rahmen) sowie die jährlichen CO₂-Einsparungen der 13 kurzfristigen Maßnahmen.

Bild 15 listet Stromeinsparpotenziale bzw. Eigenstromerzeugung (roter Rahmen) sowie die jährlichen CO₂-Einsparungen der 14 abhängigen Maßnahmen auf.

2.5 Akteursbeteiligung

Beim Projektstartgespräch am 25.01.2012 wurden der Projektablauf sowie die Zielsetzung des Klimaschutzteilprojektes mit allen bei der Stadt Bonn Beteiligten auf der Basis einer vorbereiteten Präsentation besprochen. Interviewpartner der Stadt Bonn aus der Verwaltung und Betrieb wurden am 10.04.2012 und 04.05.2012 befragt. Ein wesentliches Ergebnis des Interviews mit dem Betriebsleiter der Kläranlage Bonn Salierweg war, dass bereits seit längerer Zeit regelmäßig Workshops und Besprechungen auf Meisterebene zum Klimaschutz auf der Kläranlage Bonn Salierweg stattfinden.

Die Bearbeitung des Projektes wurde fachlich von der Stadt Bonn auf Zwischenterminen (Projektstatusbesprechungen) am 31.07. 2012, 06.12.2012, 07.03.2013 und 22.04.2013 auf der Basis der jeweiligen Bearbeitungsstände begleitet (siehe Bild 16).

2.6 Controlling-Konzept

Als Controlling-Konzept soll auf der Kläranlage Bonn Salierweg im Prozessleitsystem ein Betriebsdatenbild entsprechend Bild 17 erstellt werden, dass die Daten des Energiechecks tagesaktuell erstellt und den anlagentypisch nach DWA-A 216 berechneten Idealwerten gegenüberstellt.

Mit den PLS-Tabellen könnten die Wirkungen der Energieeinsparmaßnahmen sowie schleichende Energiezuwächse (Verschleiß der Pumpenlaufräder, Zunahme Stromverbrauch der Belüftung, etc.) beobachtet werden.

2.7 Konzept für die Öffentlichkeitsbeteiligung

Um die im Konzept erarbeiteten Maßnahmen während ihrer Umsetzung bei Verwaltung, Rat und mit dem Thema befasste Ausschüsse sowie der Bonner Bevölkerung bekannt zu machen und die nachhaltige Wirkung des partizipativen Prozesses zu steigern, wurde als praktischer Vorschlag zur Öffentlichkeitsarbeit eine Kurz-Präsentation (siehe Anhang) erarbeitet.

Die Ergebnisse des Klimaschutz-Teilprojektes sollten in der Form der Kurzfassung und der Kurzpräsentation als Anhang im Internet als pdf eingestellt und dadurch der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

2.8 Ergebnisse

2.8.1 Strom- und Wärmeverbrauchsentwicklung, Kosten und Nutzen

Das Bild 19 zeigt die Energiebilanz für

- Stromverbrauch, Eigenerzeugung und Fremdbezug (Bild 19 oben links)
- Wärmeanfall und Verbrauch (Bild 19 oben rechts)
- Energiekosten (Bild 19 unten links) und
- Kosten-/Nutzenverhältnis (Bild 19 unten rechts).

für die Kläranlage nach Realisierung der einzelnen Maßnahmenpakete.

Durch die Umsetzung der aufgeführten Maßnahmen ist für die Kläranlage Bonn Salierweg eine deutliche Steigerung der Eigenstromproduktion auf 9,5 GWh/a möglich. Zukünftig ist dann nur noch ein Fremdstrombezug von 3,6 GWh/a erforderlich (Bild 19 oben links). Durch die abhängigen Maßnahmen D1b sowie S1 wird die Wärmeeigenerzeugung reduziert. Damit muss kein großer Wärmeüberschuss mehr gekühlt werden (Bild 19 oben rechts). Die Gesamtenergiekosten zur Deckung des elektrischen und thermischen Energieverbrauchs könnten nach Realisierung aller Maßnahmen um 1,8 Mio. €/a reduziert werden (Bild 19 unten links).

Die Gesamtjahreskosten würden unter Berücksichtigung aller Sofort-, kurzfristigen- und abhängigen Maßnahmen um circa 1,5 Mio. €/a erhöht werden. Der Nutzen ist mit 2,3 Mio. €/a jedoch deutlich höher (siehe Bild 19 unten links).

Sowohl durch die sofortigen und kurzfristigen, wie auch durch die Realisierung der abhängigen Maßnahmen ist in allen Bereichen das Kosten-/Nutzenverhältnis kleiner als 1, d. h., alle empfohlenen Maßnahmen sind nicht nur klimawirksam, sondern auch wirtschaftlich (siehe Bild 19 unten rechts). In Bild 21 ist das durch die Maßnahmen vorgegebene Konzept für den Kläranlagenausbau mit den daraus resultierenden Stoff-, Energie- und Emissionsströmen im Vergleich zum Ist-Zustand (Bild 9) als Blockschema dargestellt.

2.8.2 CO₂-Einsparungen

Durch die in der Energieanalyse vorgeschlagenen sofortigen und kurzfristigen Maßnahmen kann für die Kläranlage Bonn Salierweg eine Reduzierung der CO₂-Emission um rund 8.700 t CO₂/a ermittelt werden, wobei die wesentliche Reduzierung des CO₂ aus dem Einkauf von zertifiziert CO₂-freien Stroms resultiert. Bild 20 zeigt die CO₂-Emissionen und die CO₂-Einsparungen für die Kläranlage nach Realisierung der einzelnen Maßnahmenpakete. Durch Sofortmaßnahmen wurden bereits 8.695 t CO₂/a eingespart, wobei die wesentliche Einsparung bisher durch den Kauf des CO₂-freien zertifizierten Stroms mit rund 8.311 t CO₂/a erfolgte. Nach der Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen werden 14.819 t CO₂/a eingespart.

2.8.3 Energienachweis

Bild 22 zeigt den Vergleich der Kennwerte im IST-Zustand und nach Realisierung der jeweiligen Maßnahmenpakete mit den Richt- und Idealwerten nach dem DWA-A 216.

Durch Realisierung aller Maßnahmen

- sinkt der spezifische Gesamtstromverbrauch unter den Idealwert,
- sinkt der spezifische Stromverbrauch für die Belüftung unter den Idealwert,
- steigt die spezifische Faulgasproduktion über den Richtwert,
- steigt der Eigenversorgungsgrad Strom auf 95% ohne KVA und auf 69 % mit KVA,
- bleibt der spezifische Wärmebezug mit 0 kWh/(E·a) für die Kläranlage unter dem Idealwert,
- Steigt der Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität auf 37 %,
- wird die Kläranlage CO₂-neutral.

Der Stromfremdbezug (Kauf von Strom) kann durch die Realisierung aller Maßnahmen von derzeit 14,8 GWh/a auf 3,6 GWh/a reduziert werden.

3 Zusammenfassung

Im Rahmen des Klimaschutz-Teilkonzeptes wurde eine detaillierte Analyse des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung für die Kläranlage Bonn Salierweg durchgeführt. Die Grundlage bilden bereits erstellte Energieanalysen und Studien zur verfahrenstechnischen Optimierung der biologischen Stufe und der Klärschlammverbrennungsanlage.

Der wesentliche Anteil der benötigten thermischen Energie wird bereits regenerativ durch die Faulgasnutzung bereitgestellt.

Durch die vorgeschlagenen Maßnahmenpakete können die Idealwerte nach DWA-A 216 erreicht werden. Die kurzfristigen und abhängigen Maßnahmen erfordern vor der Ausführung zur wirtschaftlichen Planung Voruntersuchungen (siehe Bild 23).

Durch die in der Energieanalyse vorgeschlagenen sofortigen und kurzfristigen Maßnahmen kann für die Kläranlage Bonn Salierweg eine Reduzierung der CO₂-Emission um rund 8.700 t CO₂/a ermittelt werden, wobei die wesentliche Reduzierung des CO₂ aus dem Einkauf zertifiziert CO₂-freien Stroms resultiert. Mit der Umsetzung der abhängigen Maßnahmen kann die Eigenstromerzeugung wesentlich erhöht werden und der Bezug von Fremdstrom entsprechend reduziert werden. Durch die Umsetzung aller Maßnahmen des Klimaschutzteilkonzeptes werden rd. 15.000 t CO₂-Emissionen jährlich eingespart. Die prozessbedingten Emissionen aus N₂O und CH₄ können nach derzeitigem Stand der Forschung nur grob abgeschätzt werden. Zur Ableitung konkreter Klimaschutzmaßnahmen sind Messungen der tatsächlichen Methan- und Lachgaskonzentrationen und -frachten erforderlich.

Die Personalsituation wurde analysiert und für ausreichend befunden. Mit dem Klimaschutz-Teilkonzept wurden aus der Bewertung von 67 Maßnahmen 44 erfolgversprechende Maßnahmen zur Energieeinsparung und Klimagasreduzierung aufgezeigt. Damit ist die Entwicklung einer Entscheidungsgrundlage und eines strategischen Planungsinstrumentes gegeben, mit denen dauerhaft Treibhausemissionen und Energiekosten der Abwasserreinigung gesenkt werden können.

4 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] WiW-Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft, "Energiestudie für die Kläranlage Bonn-Salierweg, i. A. der Bundesstadt Bonn," 2010.
- [2] E. A.Müller et al., Energie in Kläranlagen - Handbuch. Düsseldorf: MURL-NRW, Schwannstraße 3, Düsseldorf, 1999.
- [3] Bundesstadt Bonn, Masterplan Klimaschutz und Energiewende Bonn, 2011, Ratsbeschluss der Stadt Bonn vom 14.07.2011.
- [4] Tiefbauamt Stadt Bonn, "Abwasserbeseitigungskonzept 2012 - 2017," 2011.
- [5] Tiefbauamt Stadt Bonn, "Geschäftsbericht Tiefbauamt Bonn 2009," Aug. 2010.
- [6] Tiefbauamt Stadt Bonn, "Geschäftsbericht Tiefbauamt 2010," 2011.
- [7] IWN and i. A. der Bundesstadt Bonn Ingenieurbüro für Abwasser- und Schlammbehandlung, "Studie zur Verfahrensoptimierung der biologischen Stufe unter Einbeziehung der mechanischen Stufe der Kläranlage Bonn-Salierweg," 2011.
- [8] i. A. der Bundesstadt Bonn Fleminger GmbH, "Konzeptstudie: Zukunftssicherung der Klärschlammverbrennungsanlage (KVA) Bonn," 2005.
- [9] i. A. der Bundesstadt Bonn Fleminger GmbH, "Konzeptstudie: Zukunftssicherung der Klärschlammverbrennungsanlage (KVA) Bonn - Zusatzbetrachtung," 2007.
- [10] i. A. der Bundesstadt Bonn Fleminger GmbH, "Voruntersuchung über die Möglichkeiten einer künftigen Nutzung des Dampfes in der KVA Bonn," 2010.
- [11] DWA, "DWA-A 216: Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen," DWA, Hennef, DWA-Arbeitsblattentwurf 2011.
- [12] W. Bolle and et al, "Carbon-Footprint-Modell für die wasserwirtschaftliche Praxis," in GWA Bd. 230, 45. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. Aachen, 2012, pp. 5/1 - 5/13.
- [13] BMI, "Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, EnEV 2007 - 2009," Bundesinnenministerium, Berlin, 2010.
- [14] Lengede Dr.-Ing. Julia Kopp and Geiselbullach Germany, Dr. Paal Jahre Nilsen, Hans Rasmus Holte, Harald Kleiven, Johnny Kårbø, CAMBI AS, Norway Dipl.-Ing. Thilo Kopmann, "FULL SCALE CONTINUOUS THERMAL HYDROLYSIS OF WASTE ACTIVATED SLUDGE FOR THE IMPROVEMENT OF SLUDGE DIGESTION AND SLUDGE DEWATERING IN WWTP GEISELBULLACH IN GERMANY," in 15th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2010.
- [15] EU, "EC Nr. 640/2009," 2009.

- [16] Stadtwerke Bonn. (2011, Januar) Stadtwerke Bonn GmbH: Einzelansicht. [Online]. http://www.stadtwerke-bonn.de/stadtwerke-bonn/swb-konzern/medienservice/pressemitteilungen/einzelansicht/nachricht/led-pilotprojekt-mit-positiven-ergebnis-sen.html?tx_ppwuks_pi1%5Bpage%5D=4&cHash=ed3c786ac0a6599d3c2613ead5b6175b
- [17] Amt für Verkehrsmanagement der Stadt Düsseldorf. (18. Dezember 2007, Dezember) Landeshauptstadt Düsseldorf - Erste deutsche LED-STraßenlaternen leuchten jetzt in Düsseldorf. [Online]. <http://www.duesseldorf.de/verkehrsmanagement/aktuelles/led.shtml>
- [18] Rat-Verwaltung der Stadt Bielefeld. (2013, Januar) Bielefeld-Erneuerung der Beleuchtung. [Online]. http://www.bielefeld.de/de/rv/ds_stadtverwaltung/afv/know/ebe.html
- [19] Phillips, "LEDs in der Straßenbeleuchtung," Phillips-Lighting, Lübeckertordamm 5 , 20099 Hamburg, Tel. Nr. 01803/888 333, Prospekt, E-Mail: lighting.info-center@philips.com, <http://www.lighting.philips.de/> 08-2010.
- [20] BMU. (24. Oktober 2012, Oktober) BMU-Klimaschutzinitiative. [Online]. http://www.bmu-klimaschutzinitiative.de/de/projekte_nki?d=450
- [21] Stadt Bonn, "Dachflächenprüfung der Kläranlagen Salierweg und Godesberg zur PV-Nutzung," Stadt Bonn, Bonn, Interner Bericht 2011.
- [22] Aachen Tutthahs&Meyer Ingenieurgesellschaft mbH, "Dachsanierung der KVA der Kläranlage Bonn Salierweg mit einem Fotovoltaikdach - Machbarkeitsstudie," Aachen, Machbarkeitsstudie November 2008.