



Benchmarksystem für Biogasanlagen

Abschlussbericht

Andreas Buschmann

Josef Schober

Mathias Effenberger

Impressum:

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de
Tel.: 08161/71-3450

Juli 2013

© LfL

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Benchmarksystem für Biogasanlagen

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstraße 2
86179 München

Auftragsdatum: 27.05.2008 K/08/05

Projektleitung: Dr.-Ing. Mathias Effenberger

Bearbeiter: Andreas Buschmann
Josef Schober
Dr.-Ing. Mathias Effenberger

Berichtsabschluss: 15.07.2013

Berichtsumfang: 55 Seiten

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary	2
1 Einleitung	3
2 Stand des Wissens	5
3 Zielsetzung	6
4 Material und Methoden	7
4.1 Kennzahlenbasierte Bewertung von Biogasanlagen	7
4.1.1 Anwendung der „Data Envelopment Analysis (DEA)“	8
4.1.2 Anwendung des „Analytischen Hierarchie-Prozesses (AHP)“	9
4.1.3 Anwendung von Fuzzy Sets und Fuzzy-Mathematik	11
4.1.4 Erweiterung der Fuzzy-Methode um Elemente eines Expertensystems	15
4.2 Umsetzung in eine Web-Anwendung	21
4.2.1 Gesamtkonzept	21
4.2.2 Technische Umsetzung	21
4.2.3 Datenerfassung	22
4.2.4 Datenauswertung	22
5 Ergebnisse und Diskussion	24
5.1 Test der Bewertungsansätze mit einem Datensatz von den Bayerischen Pilot-Biogasanlagen	24
5.1.1 Ergebnisse der DEA	24
5.1.2 Ergebnisse des AHP	26
5.1.3 Ergebnis des Bewertungsansatzes mit Fuzzy-Elementen	29
5.1.4 Ergebnis der Fuzzy-Methode mit Expertensystem-Elementen	30
5.1.5 Vergleich der Testergebnisse	31
5.2 Beispiel für den Gebrauch der Webanwendung	33
5.2.1 Datenerfassung	33
5.2.2 Auswertung	39
5.2.3 Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung	43
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	44
7 Veröffentlichungen aus dem Projekt	45
8 Literaturverzeichnis	46

Abbildungsverzeichnis

1. Relative Häufigkeitsverteilung der Auslastung der gesamten elektrischen BHKW-Kapazität (Arbeitsausnutzung) von 61 Biogasanlagen (Quelle: [5]).....	3
2. Biogasanlage als System zur Energieumwandlung.....	9
3. Struktur des AHP für die Ermittlung von Gewichtungsfaktoren für Kennzahlen	11
4. Fuzzy-Zahl für den Gewichtungsfaktor des Bewertungskriteriums C1 – Methanausbeute relativ	13
5. Fuzzy-Zahl für den Kennwert „Relative Methanausbeute“ (K1).....	13
6. Fuzzy-Effizienz-Klassen für die Kennzahl „Relative Methanausbeute“ (K1).....	14
7. Fuzzy-Effizienzklassen und Fuzzy-Kennwert der Biogasanlage „A“ für die Kennzahl „Relative Methanausbeute“	14
8. Beispiel für die Ableitung der Folgerung einer Effizienzkategorie aus zwei Regeln	16
9. Konzept der webbasierten Beratungshilfe „ <i>Biogas Doc</i> “	21
10. Funktionsschema der Webanwendung	22
11. Datenmodell für die flexible, hierarchische Navigation	23
12. Ablauf der Datenerfassung mit linearer Navigation.....	23
13. Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: CCR-Modell (links), „Super-efficiency“-CCR-Modell (rechts).....	24
14. Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: BCC-Modell (links), „Super-efficiency“-BCC-Modell (rechts).....	25
15. Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: „Slack-based“-Modell (links), „Bad output“-Modell (rechts).....	25
16. Gewichtungsfaktoren für acht spezifische Kennzahlen nach AHP mit dem Fachbeirat Biogas der LfL.....	27
17. Rangfolge der Pilotanlagen für die Auswahl der Demonstrationsanlagen nach AHP und additiver Gewichtung	27
18. Gewichtungsfaktoren nach AHP der Betreiber der Pilot-Biogasanlagen	28
19. Rangfolge der Pilotanlagen additiver Gewichtung mit veränderten Faktoren	29
20. Hauptmenü des <i>Biogas Doc</i> (Ansicht in Mozilla Firefox 11.0, Standardeinstellungen).....	33
21. Erfassung der „Stammdaten“ (hier: Anlagenstatus).....	34
22. Gliederung der Anlagenkonfiguration.....	34
23. Anlegen eines neuen Aggregates / Bauwerks am Beispiel Substrateintrag	34
24. Auswahl der Einbringtechnik.....	35
25. Berechnungshilfe für das Arbeitsvolumen von Behältern	35
26. Eingabemaske für die Erfassung von Prozesstemperatur und Laborergebnissen	36
27. Eingabemaske für die Spezifikation eines Zündstrahl-BHKW.....	36

28. Übersichtsseite für die Konfiguration der Biogasanlage.....	37
29. Beispiel der Substratkonfiguration für Schweinegülle.....	37
30. Eingabemaske für die Erfassung der Biogasproduktion	38
31. Eingabemaske „Strom“ (Gesamteinspeisung)	39
32. Eingabemaske „Wärme“	39
33. Übersicht / Menü der Auswertung	39
34. Report zu den Einsatzstoffen / Substraten.....	40
35. Report zum Fermenter.....	41
36. Report zur Biogasproduktion	41
37. Report zur Biogasverwertung.....	42
38. Anzeige des Ergebnisses der Effizienzbewertung.....	43

Tabellenverzeichnis

1. Kenndaten der zehn bayerischen „Biogas-Pilotanlagen“	7
2. Für die DEA verwendete Eingangs- und Ausgangsgrößen.....	9
3. Spezifische Kennzahlen für die Auswahl der Demonstrationsanlagen.....	10
4. Ausprägung der spezifischen Kennzahlen der zehn Pilotanlagen (Einheiten siehe Tab. 3)	10
5. Fuzzyfizierung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskriterien	12
6. Fuzzyfizierung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskategorien.....	12
7. Relativer Fehler der bewerteten Kennzahlen (errechnet aus Fehlerfortpflanzung).....	15
8. Beurteilung der Entwicklungsstufen des Bewertungsverfahrens für Biogasanlagen	18
9. Regelwerk für die Abschätzung des Kennwertes „Eigenwärmeverbrauch (EWV)“	19
10. Normierte Parameterwerte für die zehn Biogasanlagen (vgl. Tab. 2).....	24
11. Rangfolge der Pilotanlagen aus unterschiedlichen DEA-Modellen (farbige Markierungen dienen dem besseren Erkennen von Gemeinsamkeiten bzw. Unterschieden zwischen den Ergebnissen)	26
12. Normierte Kennzahlen der zehn Pilotanlagen.....	26
13. Rangfolge und Klassifizierung nach Effizienzwerten der zehn Pilotanlagen als Ergebnis des dritten Bewertungsansatzes	30
14. Rangfolge und Klassifizierung nach Effizienzwerten der zehn Pilotanlagen als Ergebnis des vierten Bewertungsansatzes.....	31
15. Gegenüberstellung der Rangfolgen der Pilotanlagen in der Gesamtbewertung nach unterschiedlichen Bewertungsmethoden	31

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytischer Hierarchie-Prozess
Akh	Arbeitskraftstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Criterion
CCM	Corn-Cob-Mix
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DEA	Data Envelopment Analysis
EWV	Eigenwärmeverbrauch
FM	Frischmasse
GPS	Ganzpflanzensilage
I	Input
K	Kennzahl / Kriterium
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
m ³ _N	Kubikmeter (Normbedingungen)
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
O	Output
oTM	organische Trockenmasse
Rfas	Rohfaser
THG	Treibhausgasemissionen

Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt hatte zum Ziel, eine auf Kennzahlen basierende technische Bewertung von Biogasanlagen zu ermöglichen, die eine anlagenindividuelle Schwachstellenanalyse und einen Vergleich unterschiedlicher Biogasanlagen ermöglicht. Die hierfür zu entwickelnde Methode sollte in eine Software-Anwendung umgesetzt werden, welche von Anlagenbetreibern und deren Beratern für die Kontrolle der technischen Effizienz von Biogasanlagen verwendet werden kann.

Nachdem verschiedene Bewertungsansätze geprüft worden waren, wurde eine Methode mit Elementen der Fuzzy Logik und eines Expertensystems entwickelt. Mit dieser Bewertungsmethode kann eine zusammenfassende Bewertung einer Biogasanlage anhand von technischen, umweltbezogenen und ökonomischen Kriterien erfolgen, ohne dass es zu einer Kompensation zwischen einzelnen Kriterien kommt. Die Bewertung misst sich am Stand der Technik der landwirtschaftlichen Biogastechnologie. Die erreichte „Effizienzklasse“ („sehr gut“ / „gut“ / „ausreichend“ / „ungenügend“) gibt eine Auskunft über den Verbesserungsbedarf der einzelnen Anlage, der errechnete „Effizienzwert“ ermöglicht es, Biogasanlagen anhand ihres Bewertungsergebnisses in eine Rangfolge zu bringen.

Der verfahrenstechnische Aspekt der Bewertungsmethode wurde in eine Webanwendung umgesetzt (*Biogas Doc*). Mit dieser Anwendung können Betreiber und / oder deren Berater Biogasanlagen am Stand der Technik messen und einen Verbesserungsbedarf identifizieren. Der *Biogas Doc* wurde bereits mit Beratern an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten getestet. Hieraus ergaben sich Anregungen für die Erweiterung des Werkzeugs um ein Modul für die Ursachenforschung bei Schwachstellen an der Anlage und zur Verbesserung der Funktionalität.

Mit dem *Biogas Doc* steht ein webbasiertes Werkzeug für das Benchmarking von Biogasanlagen in der Landwirtschaft zur Verfügung, das im Rahmen der staatlichen Beratung oder der Selbsthilfe von Anlagenbetreibern genutzt werden kann.

Summary

The main goal of this project was to develop a method for the technical assessment of biogas plants using specific characteristic figures. The method should be able to analyze weak points of individual biogas installations and to compare different plants. Based on this method, a web based application was to be developed that could be used as a tool for operators and consultants to control the technical efficiency of biogas plants.

After testing various assessment approaches, it was decided to proceed with a methodology that uses elements of fuzzy logic and expert systems. Using this methodology, it is possible to do a comprehensive assessment of biogas plants with respect to technical, environmental and economical aspects. The assessment is based on the state-of-the-art of biogas technology in agriculture. Biogas plants are categorized by “efficiency classes” (“very good” / “good” / “adequate” / “unsatisfactory”) which state the need for improvement. At the same time, biogas plants can be ranked using the “efficiency value” calculated from the assessment algorithm.

The assessment of the technical aspect was transferred into the web application *Biogas Doc*. Using this application, operators and / or consultants can assess the efficiency of biogas plants and identify the need for improvement. The *Biogas Doc* has been tested by consultants with the state advisory service for agricultural engineering, and various suggestions for enhancing the functionality of the application have been received. The next step would be to implement a module for identifying the most probable reasons for weak points of a biogas plant and proposing possible optimization measures.

The *Biogas Doc* offers a web based tool for the benchmarking of biogas plants in agriculture which may be used by consultants or plant operators themselves.

1 Einleitung

Der Zubau an Biogasanlagen in der Landwirtschaft verlief vor allem in den Jahren 2004 bis 2011 so rasant, dass die technologische Entwicklung und die Qualifikation der Betreiber nicht immer Schritt halten konnten. Als Folge dessen muss man davon ausgehen, dass auf Biogasbetrieben die Ertragspotentiale nicht immer vollständig ausgeschöpft werden können. Im schlimmsten Fall kann es zu einem unwirtschaftlichen und ökologisch fragwürdigen Anlagenbetrieb kommen. Es kann daher ein erheblicher Bedarf für Methoden und Hilfsmittel zur Bewertung und Verbesserung der Prozesseffizienz von Biogasanlagen konstatiert werden.

Der Betrieb einer Biogasanlage ist ein sehr komplexer Prozess und wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Entsprechend groß ist die Herausforderung, den Prozesserfolg zu bewerten und konzeptionell unterschiedliche Biogasanlagen hinsichtlich ihrer Effizienz einzuordnen. Es bedarf hierfür eines Systems eindeutig definierter Kennzahlen sowie einer geeigneten Methodik für die vergleichende Bewertung der Anlagen [1].

Grundlegende Vorarbeiten hierzu wurden in Vorläuferprojekten zum Monitoring der Bayerischen Pilotbetriebe zur Biogasproduktion geleistet. In diesen Projekten wurden von der LfL Kennzahlenvergleiche hinsichtlich technischer, umweltbezogener und betriebswirtschaftlicher Aspekte durchgeführt [2],[3],[4]. Solche Kennzahlenvergleiche wurden auch von anderen Autoren vorgelegt (insbesondere [5]). Verfügt man über eine größere Stichprobe von Anlagen, so lassen sich diese für einzelne Kennzahlen in Klassen einteilen. Anhand dieser Klassen lassen sich andere Biogasanlagen qualitativ einordnen, wenn für diese die entsprechenden Kennzahlen bekannt sind. Ein Beispiel zeigt Abb. 1.

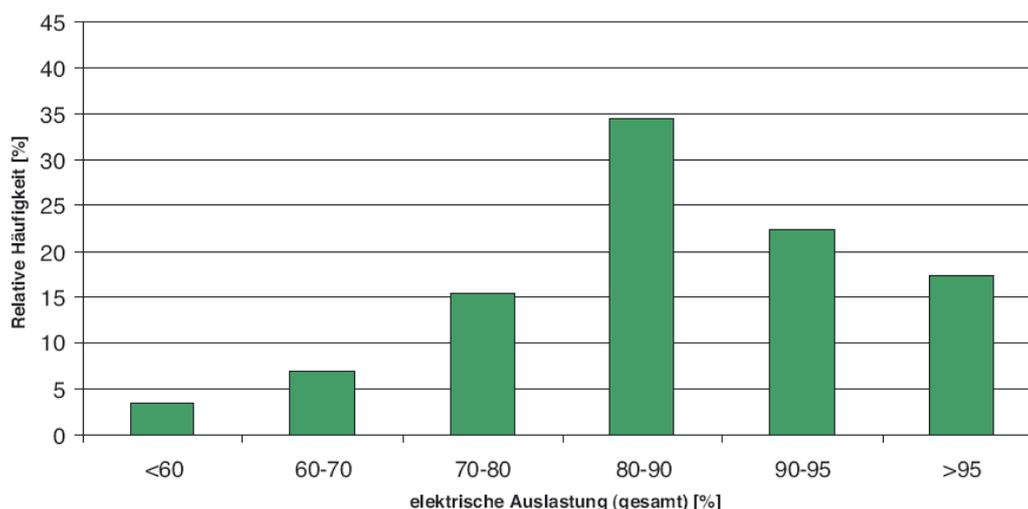


Abb. 1: Relative Häufigkeitsverteilung der Auslastung der gesamten elektrischen BHKW-Kapazität (Arbeitsausnutzung) von 61 Biogasanlagen (Quelle: [5])

Es können auch Zielwerte („Benchmarks“ im weiteren Sinne) für einzelne Kennzahlen vorgegeben werden, die auf theoretischen Überlegungen oder politischen Zielsetzungen beruhen. Die Aussagekraft solcher einfachen Kennzahlenvergleiche ist jedoch begrenzt. So kann zunächst keine Aussage gemacht werden, wie das Ergebnis einer bestimmten Kennzahl zustande kommt. Hierfür ist die Betrachtung mehrerer Kennzahlen im Zusammenhang erforderlich.

Für die übergreifende Bewertung beispielsweise der technischen Effizienz von Anlagen stellt sich die Frage, welche Kennzahlen heranzuziehen sind, um die Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz von Biogasanlagen zu beschreiben und ob und wie diese gewichtet und aggregiert werden.

Ein verlässlicher kennzahlbasierter Vergleich von Biogasanlagen ist nur möglich, wenn die Daten für die Ermittlung dieser Kennzahlen mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen. Wie die wissenschaftliche Begleitung der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen zeigt, ist dies mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Für die Anwendung eines Bewertungssystems in der Praxis stellt dies einen kritischen Faktor dar, da von einem Anlagenbetreiber die Daten in entsprechender Qualität zur Verfügung gestellt werden müssen, wenn dieser seine Anlage zuverlässig bewerten will. Durch eine automatisierte Erfassung kann die Verfügbarkeit von Messdaten verbessert und deren Auswertung erleichtert werden.

Benchmarking im klassischen Sinne bezeichnet „die Suche nach den besten Industriepraktiken, die zu Bestleistungen führen“ [6]. Ein Benchmark ist in diesem Sinne ein Referenzpunkt einer gemessenen Bestleistung, nach welchem die Mitbewerber streben. Benchmarks für Biogasbetriebe sind damit dynamische Größen, die sich mit der Entwicklung der Technik, der prozessbiologischen Erkenntnisse und der ökonomischen Rahmenbedingungen (Investitions-, Betriebs- und Rohstoffkosten) ändern. Die Kernidee des Benchmarking ist es, existierende erfolgreiche Problemlösungen („Best Practices“) zu nutzen, um die eigenen Aufgaben besser zu lösen.

Das Benchmarking geht damit über einen reinen Kennzahlenvergleich hinaus, da neben der Frage „Wer ist besser?“ zugleich die Frage gestellt wird „Warum ist das Ergebnis besser?“ oder „Welche Lösungsansätze wurden verfolgt?“. Ziel ist ein möglichst großer Lerneffekt. Dies kann nur gelingen, wenn unter den Interessenten eine entsprechend große Transparenz der Prozesse vorhanden ist.

2 Stand des Wissens

Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden üblicherweise als einer von mehreren Betriebszweigen geführt. Der Landwirt als Betreiber kann daher nur einen Teil seiner Arbeitszeit für das Anlagenmanagement aufwenden. Während der Einarbeitungsphase und im Falle von Prozessstörungen kann die Unterstützung durch einen externen Experten wie z. B. einen Landtechnikberater erforderlich sein.

Daneben wurden als Unterstützung für den Anlagenbetreiber in den letzten Jahren Software-Anwendungen entwickelt, die eine gewisse Anzahl an Kennwerten einer Biogasanlage verarbeiten und auswerten können. Zu nennen sind hier insbesondere der „Biogasrechner“ der Firma WELTEC BIOPOWER GmbH, der „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) und das „Biogas-Benchmark-System“ der ARGE Kompost & Biogas Österreich (ARGE).

Alle drei Systeme wurden als Webanwendung konzipiert. Das KTBL bietet seinen „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ zur kosten- und registrierungsfreien Nutzung an. Das System der ARGE Kompost & Biogas Österreich ist hingegen ausschließlich den Mitgliedern der ARGE vorbehalten, die Webanwendung von WELTEC BIOPOWER wird als Vorab-service für weitergehende, kostenpflichtige Beratungsleistungen angeboten.

Die zu erfassenden technischen Basisdaten der Biogasanlage haben für alle drei genannten Systeme einen ähnlichen Umfang und umfassen die folgenden Angaben: Einsatzstoffe, Anzahl und Arbeitsvolumen der Gärbehälter, Ausführung der BHKW sowie Biogas- und Stromproduktion. Zusätzlich zu diesen Basisdaten können unterschiedliche Zusatzinformationen eingegeben werden. Die Systeme des KTBL und der ARGE erfassen darüber hinaus ökonomische Daten.

Der „Biogasrechner“ liefert eine Auswertung der wesentlichen verfahrenstechnischen Kennzahlen und eine grafische Darstellung des Optimierungspotenzials. Beim „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ wird eine grundlegende verfahrenstechnische Auswertung um ökonomische Kennzahlen ergänzt. Das „Biogas-Benchmark-System“ liefert von den drei vorgestellten Systemen die umfangreichste verfahrenstechnische und ökonomische Auswertung sowie einen Vergleich der eigenen Anlage mit einer Auswahl von Referenzanlagen.

Die an der LfL (Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur) entwickelte „Betriebszweigabrechnung (BZA) Biogas“ [7] dient vorrangig der betriebswirtschaftlichen Analyse einer Biogasanlage. Die hierfür erforderlichen verfahrenstechnischen Kennwerte werden als Zusatzinformation mit ausgegeben, jedoch nicht bewertet.

3 Zielsetzung

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte die betriebsindividuelle und vergleichende Bewertung von Biogasanlagen methodisch entscheidend vorangebracht und in eine Beratungshilfe für die landwirtschaftlichen Praxis umgesetzt werden. Hieraus wurden für die Arbeiten im Projekt die beiden folgenden Ziele abgeleitet:

1. Entwicklung einer Methode für die auf Kennzahlen basierende technische (und umweltbezogene) Bewertung von Biogasanlagen, die eine anlagenindividuelle Schwachstellenanalyse und einen Vergleich unterschiedlicher Biogasanlagen ermöglicht sowie
2. Umsetzung dieser Methode in eine Software für die Kontrolle der technischen (und umweltbezogenen) Effizienz des Betriebes von Biogasanlagen.

Im Verlauf des Projektes zeigte sich relativ frühzeitig, dass die umweltbezogene Bewertung von Biogasanlagen zu komplex und vielfältig ist, um in diesem Rahmen fundiert bearbeitet werden zu können. Es wurde hierzu ein separates Forschungsvorhaben beantragt, in dem zunächst die Treibhausgasemissionen und der kumulierte Energieverbrauch von Biogasanlagen bewertet werden sollen. Der Fokus im vorliegenden Forschungsprojekt lag damit auf der „verfahrenstechnischen Effizienz“ der Produktion und Verwertung von Biogas in landwirtschaftlichen Anlagen.

4 Material und Methoden

Die Arbeiten im Projekt gliederten sich entsprechend der beiden vorgestellten Teilziele. Es wurden Methoden der Prozessanalyse und der multikriteriellen Entscheidungsfindung untersucht und am Datensatz der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen getestet. Für die Datenerfassung, -verarbeitung und -auswertung wurde eine webbasierte Anwendung entwickelt.

4.1 Kennzahlenbasierte Bewertung von Biogasanlagen

Für das Projekt bestand die günstige Ausgangssituation, dass aus dem Monitoring der LfL umfangreiche ökonomische und technische Daten für zehn Biogasanlagen zur Verfügung standen (im Folgenden: „Pilotanlagen“). Diese Daten wurden von Anfang an dazu verwendet, verschiedene methodische Ansätze zu testen und zu evaluieren. Eine ausführliche Beschreibung dieser Anlagen und der Datengrundlage findet sich in [2], einige grundlegende Kenndaten in Tab. 1.

Ziel war die Bewertung der „Effizienz“ unterschiedlicher Ausschnitte der Biogaskette, welche an verschiedenen Kennzahlen gemessen wurde. Effizienz kann allgemein als das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand beschrieben werden. Haben Nutzen und Aufwand die Dimension „Energie“, so ergibt sich ein energetischer Wirkungsgrad bzw. Nutzungsgrad. Im Folgenden wird teilweise ein weiter Begriff der „Effizienz“ verwandt im Sinne eines möglichst hohen Nutzens aus einem erfolgten Aufwand.

Die wissenschaftliche Arbeit für die in diesem Kapitel in aller Kürze dargestellte Methodenentwicklung erfolgte im Rahmen der Dissertation von Herrn M.Sc. Djordje Djatkov an der Universität Novi Sad und ist dort ausführlich dokumentiert (Djatkov, 2013). Die anfallenden Reise- und Aufenthaltskosten für gegenseitige Besuche in den Jahren 2011 und 2012 wurden aus Mitteln des Deutschen Akademischen Austauschdienstes im Rahmen des Programms projektbezogener Personenaustausch mit Serbien gefördert.

Tab. 1: Kenndaten der zehn bayerischen „Biogas-Pilotanlagen“

ID Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Inbetriebnahmejahr	2005	2005	2004	2004	2005	2002	2005	2004	2005	2001
Massedurchsatz $t d^{-1}$	22,3	20,3	18,9	18,5	17,8	28,2	18,6	10,9	11,4	26,2
Einsatzstoffe: Tierische Exkremente [§]	RG, RM, HTK	RM	RG	-	HTK	HTK	SG, RG, RM	-	RG, RM	RG, RM
Masseanteil tier. Exkremente %	8	3	7	0	28	15	28	0	41	38
Einsatzstoffe: Nachwachsende Rohstoffe [§]	SM, GS, GR, GPS	KGS, SM, MSo, CCM, ReGe, GPS	SM, GS, GPS, CCM, GK	SM, WW, GS, WG, GR, SGs, CCM	SM	SM, MK, GPS, GS, GK	SM, MK, GPS, GS, GK, GR, TC, SGs	SM, GR, SGs, RS	GK, MK, SM, ZR	SM, GS, GPS, GK
Anzahl Prozessstufen	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Prozesstemperaturniveau	mes	mes	mes	therm	mes	mes	mes	therm	mes	mes

ID Anlage		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Nutzvolumen Fermenter	m ³	2.010	1.357	1.608	1.145	396	1.650	770	276	1.095 [§]	2.751
Nutzvolumen Nachgärbehälter	m ³	1.005	1.428	1.134	1.145	2.091	2.090	770	396	-	662
Gesamt-Nutzvolumen Gärraum ¹	m ³	3.015	2.605	2.542	2.290	2.487	3.740	1.540	672	1.095	3.413
Gärrestlager: Gesamt-Nutzvolumen	m ³	1.146	1.294	1.134	800	2.300	4.988	3.289	739	1.791	2.688
Gärrestlager		Gas-erf.	offen	Gas-erf.	offen	Gas-erf.	offen	Gas-erf.	offen	offen	Gas-erf.
BHKW: Motortyp		G-O ²	G-O	G-O	G-O	G-O	G-O	ZS ³	ZS	G-O	G-O
BHKW: Anzahl Motoren		1	1	2	2	1	1	2	1	1	2
BHKW: Elektrische Nennleistung	kW	329	333	380	420	347	526	280	250	324	380
BHKW: Thermische Nennleistung	kW	447	232	486	n.b.	432	566	300	262	250	486
BHKW: Feuerungswärmeleistung	kW	776	565	866	n.b.	779	1092	580	512	574	866

§) In der Reihenfolge abnehmender Masseanteile an der Gesamtration; §) davon Nutzvolumen Vorgärbehälter (Hydrolysegrube): 100 m³; ¹) Summe der Nutzvolumina aller Prozessstufen (ohne Gärrestlager); ²) Gas-Otto-Motor; ³) Zündstrahlmotor; mes: mesophil (25-45 °C); therm: thermophil (>50 °C); Gaserf.: Gaserfassung; n.b.: nicht bekannt; RG: Rindergülle; SG: Schweinegülle; RM: Rindermist; HTK: Hähnchentrockenkot; SM: Silomais; CCM: Corn-Cob-Mix; MK: Maiskörner; GK: Getreidekörner; WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; GR: Grünroggen; SGs: Sudangras; TC: Triticale; MSo: Mais-Sonnenblumen-Gemenge; ReGe: Resele-Gemenge; GS: Grassilage; KGS: Kleegrassilage; GPS: Getreide-Ganzpflanzensilage; WGs: Weidelgras; RS: Rasenschnitt; ZR: Zuckerrüben.

4.1.1 Anwendung der „Data Envelopment Analysis (DEA)“

Im ersten Ansatz wurde die Methode der „Data Envelopment Analysis (DEA)“ angewandt (Djatkov et al., 2009a, 2009c, 2010). DEA wird häufig eingesetzt, um die relative Effizienz einer vergleichbaren und homogenen Gruppe von „Einheiten“ oder „Objekten“ zu ermitteln und wurde bereits von anderen Wissenschaftlern auf Biogasanlagen angewandt [8],[9].

Die Anlagen wurden als Systeme für die Energieumwandlung betrachtet (Abb. 2): Aus der Vergärung der organischen Trockenmasse der Einsatzstoffe (I_1) wird Biogas erzeugt, welches in Elektrizität (O_1) und Wärme (O_2) umgewandelt wird. Die Biogasanlage selbst weist einen gewissen Eigenbedarf an elektrischer Betriebsenergie auf (I_2). Als unerwünschter Output (O_3) wurde die Emission von Treibhausgasen als Ergebnis einer Stoffstrombilanz in die Analyse mit aufgenommen (Tab. 2).

Die zehn Pilotanlagen wurden als eine homogene Gruppe betrachtet, da es sich ausnahmslos um landwirtschaftliche Biogasanlagen für den Zweck der Erzeugung von Elektrizität und Wärme aus der Vergärung landwirtschaftlicher Roh- und Reststoffe innerhalb eines begrenzten Leistungsbereichs handelt. Die Effizienz wird relativ zu einer Grenzlinie berechnet, welche von denjenigen Objekten gebildet wird, die den zu berücksichtigenden Input mit der höchsten Effizienz in den zu berücksichtigenden Output umwandeln. Das Ergebnis einer DEA ist ein Maß dafür, wie effizient die untersuchten Einheiten die „In-

puts“ in „Outputs“ umwandeln. Dieses Effizienzmaß liegt im Intervall (0,1]. Die „beste“ (effizienteste) Einheit erhält den Wert 1, während die „schlechteste“ (ineffizienteste) Einheit den geringsten Wert erhält, der stets größer als 0 ist.



Abb. 2: Biogasanlage als System zur Energieumwandlung

Tab. 2: Für die DEA verwendete Eingangs- und Ausgangsgrößen

Parameter	Einheit	DEA Kriterium
Eintrag an oTM*	kg	I ₁
Elektrizitätsbedarf der Biogasanlage	kWh	I ₂
Stromproduktion	kWh	O ₁
extern genutzte Wärmemenge	kWh	O ₂
Treibhausgasemissionen	t CO ₂ -Äq.	O ₃

*) oTM: organische Trockenmasse; I: Input; O: Output.

Für die Analyse wurden verschiedene DEA-Modelle verwendet: das CCR-Modell (nach Charnes, Cooper, Rhodes), das BCC-Modell (nach Banker, Charnes und Cooper), ein Modell mit „Schlupfvariable“ (Slack-based model, SBM) sowie ein „Bad-output-Modell“, das die Einbeziehung eines unerwünschten Outputs erlaubt. Zusätzlich wurden „Super-Effizienz-Modelle“ für CCR und BCC benutzt, mit denen die effizienten Einheiten durch Effizienzwerte größer 1 weiter differenziert werden können. Eine ausführliche Beschreibung der Methode und der für diese Arbeit verwendeten Modelle der DEA findet sich in [10].

4.1.2 Anwendung des „Analytischen Hierarchie-Prozesses (AHP)“

Als Ergebnis des Biogasanlagen-Monitorings sollten die zehn Pilotanlagen unter Berücksichtigung spezifischer technischer, umweltbezogener und betriebswirtschaftlicher Kennzahlen in eine Rangfolge gebracht werden, um daraus eine Auswahl von sogenannten „Demonstrationsanlagen“ zu treffen (Djatkov et al., 2009b). Diese Auswahl sollte durch einen Fachbeirat erfolgen, um ein objektives Urteil unter Einbeziehung von Expertenwissen zu ermöglichen.

Es stellte sich die Frage, wie hierbei die einzelnen Kennzahlen zu gewichten seien und auf welche Weise der Fachbeirat mit einbezogen werden könnte. Eine uneinheitliche Gewich-

tung von Kennzahlen könnte auch aus politischen Gründen erwünscht sein oder es könnte damit der unterschiedlichen Güte der Daten Rechnung getragen werden. Um das System einfach zu halten, wurden acht Kennzahlen in den drei Kategorien „Anlageneffizienz“, „Umweltbezug“ und „(Sozio-)Ökonomie“ ausgewählt (siehe [2] und Tab. 3).

Die Rangfolge der Pilotanlagen sollte durch eine additive Gewichtung der normierten Kennzahlen erzeugt werden. Um die benötigten Gewichtungsfaktoren zu ermitteln, wurde die Methode des Analytischen Hierarchie-Prozesses (AHP) angewandt [11],[12]. Diese Methode erlaubt es, mehr oder weniger komplexe Entscheidungsprozesse zu strukturieren und auf paarweise Vergleiche zurückzuführen. In diesem Fall wurde der AHP so strukturiert, dass lediglich acht paarweise Vergleiche der Kriterien zu erfolgen hatten (Abb. 3). Die Anwendung des AHP für die Bewertung der zehn Anlagen hinsichtlich acht Kriterien hätte 360 Vergleiche erfordert und wäre nicht praktikabel gewesen.

Tab. 3: Spezifische Kennzahlen für die Auswahl der Demonstrationsanlagen

Anlageneffizienz	
<i>Biogasverwertung</i>	
Arbeitsausnutzung BHKW	%
Netto-Nutzungsgrad Methan	%
<i>Biogasproduktion</i>	
Methanausbeute relativ	%
Methanproduktivität	$\text{m}^3_{\text{N}} (\text{m}^3 \text{d})^{-1}$
Umweltwirkung	
Spezifische THG-Emissionen	$\text{g CO}_2\text{-Äq. kWh}_{\text{el}}^{-1}$
KEA Gesamt	$\text{kWh kWh}_{\text{el}}^{-1}$
Sozio-Ökonomie	
Gewinn	$\text{€ kWh}_{\text{el}}^{-1}$
Arbeitsaufwand	$\text{Akh kWh}_{\text{el}}^{-1}$

Tab. 4: Ausprägung der spezifischen Kennzahlen der zehn Pilotanlagen (Einheiten siehe Tab. 3)

Kriterium	ID Anlage									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
K1	128	142	131	138	126	90	130	142	161	133
K2	0,76	0,68	0,78	0,98	0,97	0,76	1,0	0,74	1,2	0,65
K3	97,8	82,4	93,7	79,3	97,1	91,3	96,1	92,2	58,6	89,0
K4	30,4	30,0	65,2	49,4	49,0	58,2	42,2	50,9	42,8	42,4
K5	208	152	2	139	-44	61	140	210	101	96
K6	0,24	0,28	-0,32	0,06	-0,38	-0,36	0,28	0,26	0,09	-0,15
K7	1,88	-4,49	5,13	7,10	6,40	6,17	3,85	1,31	0,49	5,13
K8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

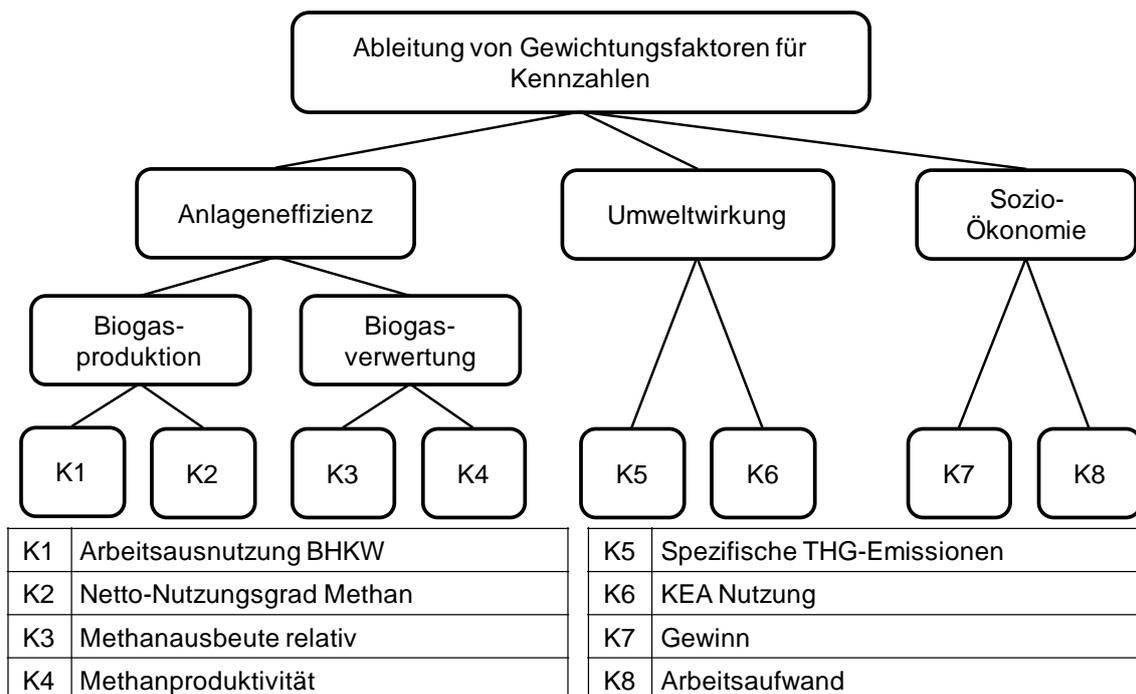


Abb. 3: Struktur des AHP für die Ermittlung von Gewichtungsfaktoren für Kennzahlen

Der AHP zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren wurde mit dem Fachbeirat Biogas in dessen 5. Sitzung am 24.07.2009 durchgeführt. Anwesend waren neun Mitglieder des Fachbeirates, die nach einer kurzen Einweisung in die Methodik Ihre Bewertung einzeln abgaben. Die Auswertung erfolgte am Ende der Sitzung. Die Gewichtungsfaktoren wurden hierzu gemittelt und es wurde durch eine additive Gewichtung („Standard Additive Weighting“ – SAW) der normierten Kennwerte nach der folgenden Formel für alle Pilotanlagen eine „Gesamt-Nützlichkei“ berechnet:

Gleichung 1:
$$U_i = \sum_{j=1}^8 w_j x_{ij} \quad i=1...10$$

- U_i : „Gesamt-Nützlichkei“ der Anlage i
- w_j : Gewichtungsfaktor des Kennwertes j
- x_{ij} : Skalierter Wert des Kennwertes j für die Anlage i

Die am besten bewertete Anlage erhält bei diesem Vorgehen den Wert „1“. Alle anderen Anlagen erhalten eine Bewertung kleiner 1. Die Kennwerte wurden auf den Wertebereich für die Pilotanlagen skaliert. Dies hat zur Folge, dass für die schlechteste Anlage jeweils der betreffende normierte Kennwert gleich 0 wird (vgl. Gleichung 1: $x_{ij} = 0$).

4.1.3 Anwendung von Fuzzy Sets und Fuzzy-Mathematik

Dieser dritte methodische Ansatz basierte auf der Methode der „Fuzzy Sets“ (Deutsch etwa: „unscharfe Daten“) und gliederte sich in die folgenden Teilschritte:

1. Erzeugung von Fuzzy-Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskriterien bzw. Fuzzy-Kennwerten der Biogasanlagen,
2. Zusammenführung der Fuzzy-Gewichtungsfaktoren und der Fuzzy-Kennzahlen zu Fuzzy-Werten,

3. Einordnung der ermittelten Fuzzy-Werte in Effizienzklassen und
4. Rangbildung der zu bewertenden Biogasanlagen durch Defuzzifizierung der ermittelten Fuzzy-Werte.

Der Code für die Durchführung der Fuzzy-Berechnungen wurde in der Software Matlab erstellt (Mathworks: Matlab Version 7, The Mathworks Inc., Natick, MA, USA).

Die Fuzzy-Gewichtungsfaktoren repräsentieren – wie die entsprechenden „scharfen“ Gewichtungsfaktoren – die relative Bedeutung der jeweiligen Bewertungskriterien. Aus den im zweiten Ansatz mit dem Expertengremium „Fachbeirat Biogas“ ermittelten Gewichtungsfaktoren wurden gleichseitige trianguläre Fuzzy-Zahlen konstruiert (Tab. 5). Hierbei wurde der exakte Wert des jeweiligen Gewichtungsfaktors als mittlerer Wert festgelegt (a_2 ; Abb. 4) und ein Abstand von 10 zu den Randwerten gewählt (a_1, a_3 ; Abb. 4). Zuvor wurden die Kriterien innerhalb der Bewertungskategorien auf einen Wert von 100 normiert. Die Fuzzy-Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskategorien wurden ermittelt, indem die exakten Faktoren für die zugehörigen Kriterien addiert und dann fuzzyfiziert wurden (Tab. 6).

Tab. 5: Fuzzyfizierung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskriterien

Kriterium	Exakter Gewichtungsfaktor	Normalisierter Faktor	Fuzzy-Gewichtungsfaktor
	%	%	($a_1; a_2; a_3$)
K1	2,8	49,1	(39,1;49,1;59,1)
K2	2,9	50,9	(40,9;50,9;60,9)
K3	3,2	30,3	(20,3;30,3;40,3)
K4	7,2	69,7	(59,7;69,7;79,7)
K5	10,8	80,2	(70,2;80,2;90,2)
K6	2,7	19,8	(18,8;19,8;20,8)
K7	58,8	83,5	(73,5;83,5;93,5)
K8	11,6	16,5	(15,5;16,5;17,5)

Tab. 6: Fuzzyfizierung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskategorien

Kategorie	Exakter Gewichtungsfaktor	Fuzzy-Gewichtungsfaktor
	%	($a_1; a_2; a_3$)
Biogasproduktion	5,7	(0,7;5,7;10,7)
Biogasverwertung	10,4	(5,4;10,4;15,4)
Umweltwirkungen	13,5	(8,5;13,5;18,5)
Ökonomie	70,4	(65,4;70,4;75,4)

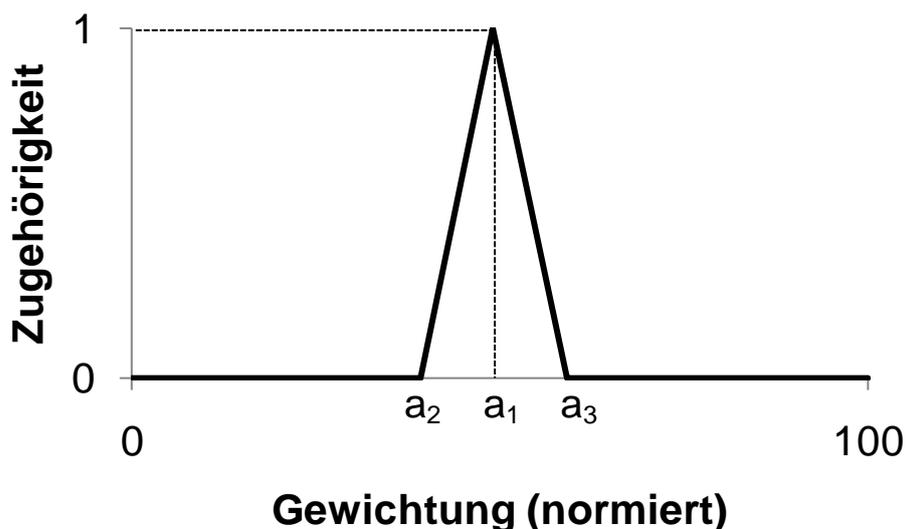


Abb. 4: Fuzzy-Zahl für den Gewichtungsfaktor des Bewertungskriteriums K1 – Methanausbeute relativ

Aus den Fuzzy-Kennwerten wurden trapezoide Fuzzy-Zahlen erzeugt, nachdem zunächst alle exakten Kennwerte im Intervall $[0;100]$ skaliert wurden. Die Parameter der Fuzzy-Zahlen $(b_1; b_2; b_3; b_4)$ wurden derart ermittelt, dass der exakte Kennwert in der Mitte des Intervalls $[b_2; b_3]$ lag (Abb. 5). Die Fuzzy-Distanzen zwischen den Parametern waren $(1;4;1)$.

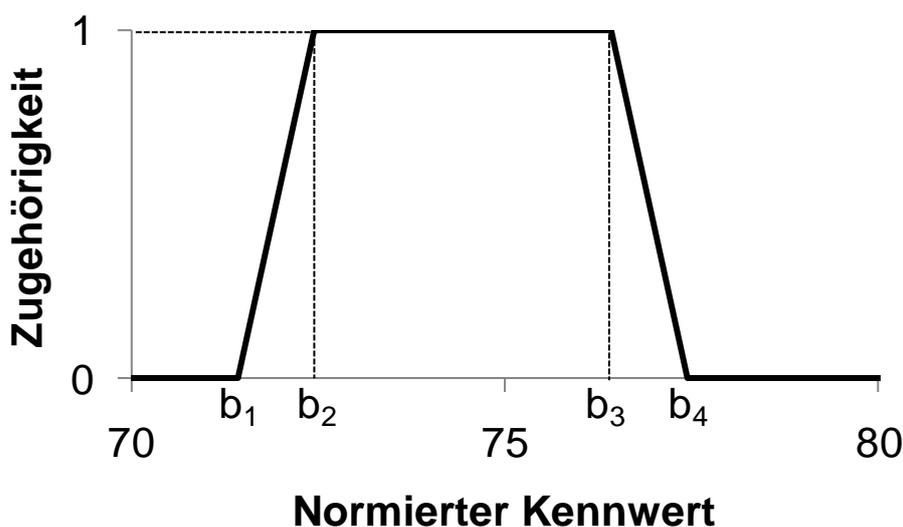


Abb. 5: Fuzzy-Zahl für den Kennwert „Relative Methanausbeute“ (K1)

In einem weiteren Schritt wurden Fuzzy-Effizienz-Klassen definiert, die eine Einordnung der Kennwerte erlauben. Auf der Grundlage von Literaturdaten und Expertenwissen wurden für alle Bewertungskriterien fünf Effizienzklassen festgelegt: „ungenügend“, „mangelhaft“, „ausreichend“, „gut“ und „hervorragend“. Abb. 6 zeigt dies für das Beispiel der Kennzahl „Relative Methanausbeute“ (K1).

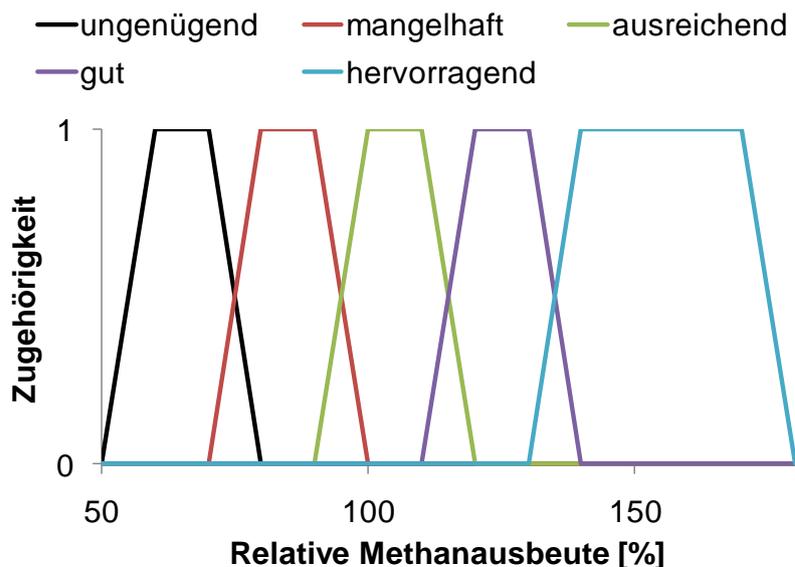


Abb. 6: Fuzzy-Effizienz-Klassen für die Kennzahl „Relative Methanausbeute“ (K1)

Für die weitere Berechnung wurden auch die Fuzzy-Zahlen der Effizienzklassen auf das Intervall [0;100] skaliert. Nun war zu ermitteln, in welche Effizienzklasse der Fuzzy-Kennwert der jeweiligen Anlagen einzuordnen ist. Hierfür wurden die Euklidischen Abstände zwischen dem Fuzzy-Kennwert \tilde{R} und den Fuzzy-Effizienzklassen \tilde{S} berechnet (Gleichung 2). Abb. 7 illustriert dies wieder für die Kennzahl „Relative Methanausbeute“ der Biogasanlage „A“.

Gleichung 2:
$$d(\tilde{R}, \tilde{S}) = \sqrt{\sum_{x=0}^{100} (\tilde{R}(x) - \tilde{S}(x))^2}$$

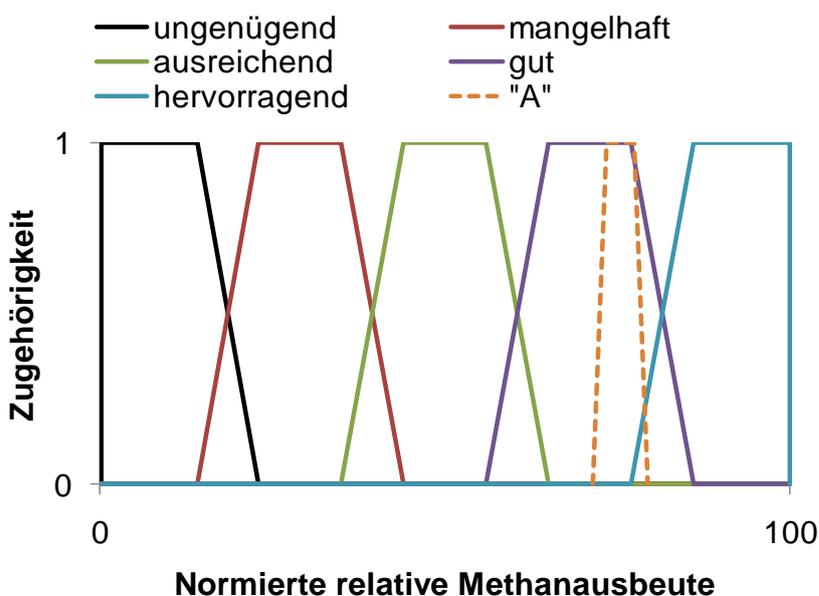


Abb. 7: Fuzzy-Effizienzklassen und Fuzzy-Kennwert der Biogasanlage „A“ für die Kennzahl „Relative Methanausbeute“

Dem Fuzzy-Kennwert wurde diejenige Effizienzklasse zugeteilt, für die der Euklidische Abstand am geringsten war. Für das Beispiel in Abb. 7 wäre dies „gut“. Um mehrere Kriterien für eine übergreifende Bewertung zusammenzufassen, muss ein Fuzzy-gewichteter Mittelwert berechnet werden. Dies kann am einfachsten durch die bereits bekannte additive Gewichtung erfolgen. Der Fuzzy-Wert für eine Bewertungskategorie bzw. für die übergreifende Bewertung wird in diesem Fall nach folgender Formel ermittelt, wobei \tilde{W}_i den Fuzzy-Gewichtungsfaktor für das Kriterium i und \tilde{C}_i den Fuzzy-Kennwert des jeweiligen Kriteriums i bezeichnet:

Gleichung 3:
$$\tilde{R} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{W}_i \tilde{C}_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{W}_i}$$

Hiermit ist nun eine Bewertung der einzelnen Anlagen gemessen am Stand der Technik möglich, soweit dieser durch die definierten Effizienzklassen widerspiegelt wird. Um nun eine bestimmte Stichprobe von Biogasanlagen in eine Rangfolge zu bringen, müssen deren Fuzzy-Werte defuzzifiziert und geordnet werden. In diesem Fall wurde zur Defuzzifizierung die Methode der Schwerpunktermittlung angewandt, wobei der x-Wert des Mittelpunkts der Fläche unter der Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Wertes nach Gleichung 4 ermittelt wurde. Die Biogasanlagen wurden dann anhand der resultierenden Effizienzwerte in eine Rangfolge gebracht (Djatkov et al., 2012a).

Gleichung 4:
$$d(\tilde{R}) = \frac{\sum_{x=0}^{100} \tilde{R}(x) * x}{\sum_{x=0}^{100} \tilde{R}(x)}$$

4.1.4 Erweiterung der Fuzzy-Methode um Elemente eines Expertensystems

Um das Problem der Kompensation zwischen Bewertungskategorien zu lösen, wurde die Fuzzy-Methode in Anlehnung an ein Expertensystem um Regeln erweitert (Djatkov et al., 2012b). Zunächst erfolgte eine Verringerung der Zahl der Effizienzklassen von fünf auf vier, um die Zahl der notwendigen Regeln einzuschränken. Für die spätere Umsetzung wurden diese Effizienzklassen analog den bekannten Schulnoten mit „sehr gut“, „gut“, „ausreichend“ und „ungenügend“ bezeichnet.

Tab. 7: Relativer Fehler der bewerteten Kennzahlen (errechnet aus Fehlerfortpflanzung)

Kriterium	Einheit	Fehler*, %
K1	%	8,0
K2	m ³ (m ³ d) ⁻¹	3,6
K3	%	2,0
K4	%	6,5
K5	g CO _{2,eq} kWh _{el} ⁻¹	10,6
K6	kWh kWh _{el} ⁻¹	16,3
K7	€ (kW _{el} a) ⁻¹	2,0
K8	Akh (kW _{el} a) ⁻¹	5,0

Bei vier Effizienzklassen und jeweils zwei Kennzahlen ergaben sich je 16 Regeln, um die einzelnen Aspekte „Biogasproduktion“, „Biogasverwertung“, „Umweltwirkung“ und „So-

zio-Ökonomie“ zu bewerten (vgl. Abb. 3). Für die Zusammenfassung der beiden Aspekte „Biogasproduktion“ und „Biogasverwertung“ zur Kategorie der „Anlageneffizienz“ waren nochmals 16 Regeln erforderlich. Um schließlich die Gesamtbewertung zu ermitteln, wurden weitere 64 Regeln benötigt. Insgesamt wurden also 144 Regeln definiert, um die „Gesamteffizienz“ einer Biogasanlage gemäß dem vorgeschlagenen Schema zu bewerten.

In Erweiterung der Methode der „Fuzzy Sets“, wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, muss nun nach Fuzzifizierung für die einzelnen Kennzahlen die Kompatibilität mit den vier Effizienzklassen für alle definierten Regeln überprüft werden. Unter Kompatibilität wird hierbei die Höhe des Schnittpunktes der Fuzzy-Kennzahl und der jeweiligen Fuzzy-Effizienzklasse verstanden. Diese ist in Abb. 8 als horizontale graue Linie eingetragen.

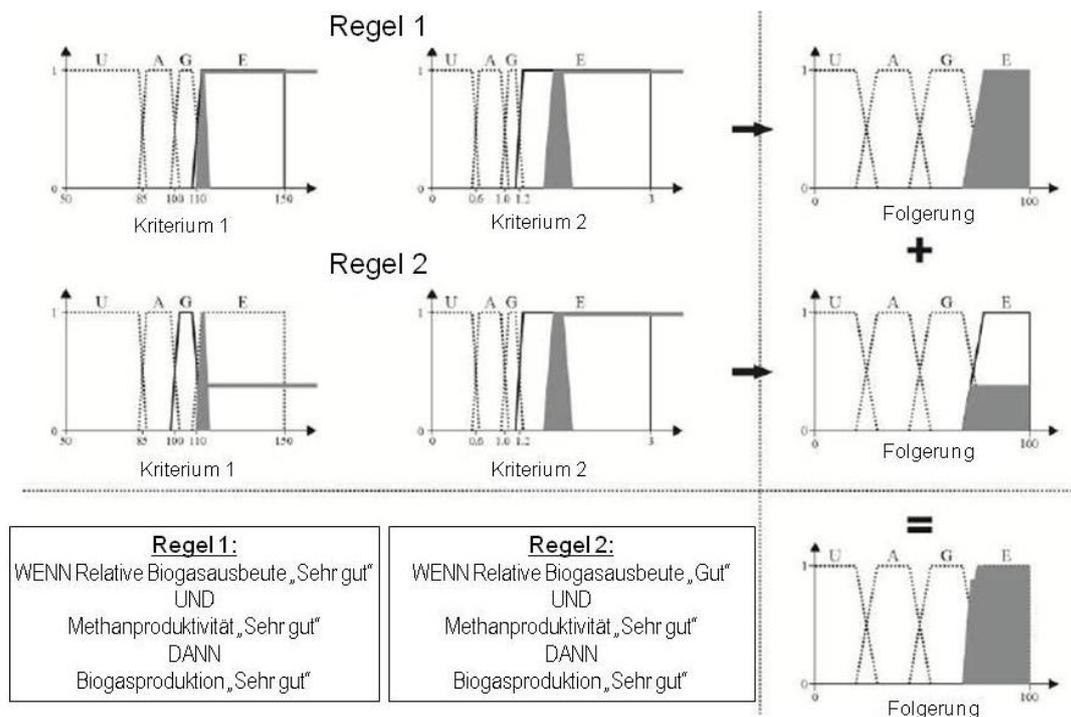


Abb. 8: Beispiel für die Ableitung der Folgerung einer Effizienzklasse aus zwei Regeln

Die Fuzzy-Werte für die Kriterien 1 und 2 stellen sich in Abb. 8 (linke Seite) jeweils als graue Flächen dar. Die Regeln wurden hier durch Anwendung des *Minimum*-Operators ausgewertet, d.h. für die Folgerung gilt die jeweils kleinste Kompatibilität mit der als durchgezogene schwarze Linie dargestellten Fuzzy-Effizienzklasse. Für die Aggregation der Folgerungen wird der *Summe*-Operator angewandt. Im Beispiel ergibt sich die rechts unten dargestellte Fuzzy-Zahl als Ergebnis für die Effizienz der Biogasproduktion. In diesem Fall werden nur zwei Regeln gezeigt, da sich für alle übrigen Regeln null Kompatibilität ergibt.

Im nächsten Schritt muss die Zuordnung des ermittelten Effizienzwertes für die Biogasproduktion zu einer Effizienzklasse erfolgen. Wie man in Abb. 8 erkennen kann, zeigt der Effizienzwert zwar hauptsächlich eine Überschneidung mit der Effizienzklasse „sehr gut“ („E“ für engl. „excellent“), teilweise aber auch mit der Klasse „gut“ („G“). Zur Lösung wird jeweils die Euklidische Distanz zwischen dem aggregierten Effizienzwert (R) und der Effizienzklasse (S) nach Gleichung 5 berechnet. Im Ergebnis erfolgt die Einordnung in diejenige Effizienzklasse, zu der die Euklidische Distanz am kleinsten ist, im Beispiel ist dies „sehr gut“.

Gleichung 5:

$$d(\tilde{R}, \tilde{S}) = \sqrt{\sum_{x=0}^{100} (\tilde{R}(x) - \tilde{S}(x))^2}$$

Um nun mehrere Biogasanlagen im Vergleich bewerten zu können, müssen die aggregierten Fuzzy-Zahlen in exakte Zahlen überführt werden („Defuzzifizierung“). Hierfür wird der Zahlenwert des Schwerpunkts nach Gleichung 6 berechnet. Anhand dieser exakten Effizienzwerte können die zu vergleichenden Biogasanlagen dann in eine Rangfolge gebracht werden.

Gleichung 6:

$$d(R) = \frac{\sum_{x=0}^{100} R(x) * x}{\sum_{x=0}^{100} R(x)}$$

Für die Weiterentwicklung der Methode erfolgte eine Beschränkung auf die Bewertungskategorie der „Anlageneffizienz“ (vgl. Tab. 3). Die fundierte Bewertung der Umweltwirkungen erschien wesentlich zu komplex und vielfältig, um in diesem Rahmen mit bearbeitet werden zu können. Für die ökonomische Bewertung wiederum hat wie oben erwähnt das Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur der LfL entsprechende Anwendungen bereitgestellt.

Mit der nun verfügbaren Methode, die eine Kombination von Elementen aus Fuzzy-Sets und Expertensystemen darstellt, ist die Grundlage für das Modul der Effizienzbewertung von Biogasanlagen gelegt. Dieses Modul liefert insgesamt sieben qualitative Bewertungen in den vier Effizienzklassen „sehr gut“, „gut“, „ausreichend“ und „ungenügend“: jeweils zwei Kriterien in den beiden Kategorien Biogasproduktion und Biogasverwertung, plus die zusammenfassende Bewertung in diesen beiden Kategorien, plus die Gesamtbewertung der Technik (4 + 2 + 1 = 7). Zusätzlich werden drei „Effizienzwerte“ (zwischen 0 und 100) für die Bereiche Biogasproduktion und Biogasverwertung sowie die Gesamtbewertung der Technik ausgegeben. Anhand dieser „Effizienzwerte“ können die Anlagen in eine Rangfolge gebracht werden. Die entwickelte Methode ermöglicht eine absolute und vergleichende Bewertung der „technischen Effizienz“ von Biogasanlagen ohne Kompensation und unter Einbeziehung von Expertenwissen (vgl. Tab. 8).

Tab. 8: Beurteilung der Entwicklungsstufen des Bewertungsverfahrens für Biogasanlagen

Methoden	Vorteile / Fortschritte	Nachteile
DEA	<p>Gewichtungsfaktoren müssen nicht spezifiziert werden</p> <p>Funktionale Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen müssen nicht bekannt sein (nicht-parametrischer Ansatz)</p>	<p>Gewichtungsfaktoren sind nicht zu beeinflussen</p> <p>Klassifizierung anhand des DEA-Effizienzmaßes schwierig</p> <p>Schwierige Auswahl des geeigneten Modells</p> <p>Anzahl der Vergleichsobjekte limitiert die Anzahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen</p> <p>keine absolute Bewertung</p>
AHP + SAW	<p>Schwächen / Stärken rasch erkennbar</p> <p>Anzahl der Anlagen praktisch unbegrenzt</p> <p>Gewichtungsfaktoren können angepasst werden</p> <p>Einbeziehung von Expertenwissen</p>	<p>Kompensation zwischen Bewertungskategorien</p> <p>Bewertungsergebnis ist abhängig von der Stichprobe</p> <p>keine absolute Bewertung</p>
Fuzzy-Sets	<p>Schwächen / Stärken rasch erkennbar</p> <p>Anzahl der Anlagen praktisch unbegrenzt</p> <p>Gewichtungsfaktoren können angepasst werden</p> <p>Absolute Bewertung / Einteilung in Effizienzklassen ist möglich</p> <p>Einbeziehung von Expertenwissen</p>	<p>Kompensation zwischen Bewertungskategorien</p>
Fuzzy-Sets + Expertensystem	<p>Erweiterung des Expertenwissens</p> <p>Kompensation kann durch Regeln aufgefangen werden</p>	<p>zunehmend komplexe Struktur</p>

Als letzter Entwicklungsschritt im Projekt wurde an einer Methodik gearbeitet, die dem Nutzer eine Hilfestellung geben soll, die aus der Effizienzbewertung resultierenden Schwachstellen der Anlage genauer zu fassen, deren wahrscheinlichste Ursachen zu identifizieren und Ansätze für deren Beseitigung / Abmilderung zu finden. Dieser Entwicklungsschritt wird im Gesamtkonzept für die zu entwickelnde Anwendung als drittes Modul unter der Bezeichnung „Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung“ geführt.

Die Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung erfolgt ausgehend von den Ergebnissen des Moduls „Effizienzbewertung“. Durch Betrachtung zusätzlicher Kennzahlen und Eigenschaften der Biogasanlage wird die Effizienzbewertung spezifiziert, um die wahr-

scheinlichsten Ursachen für vorhandene Schwachstellen zu finden. Zu diesem Zweck muss die Datenerfassung an verschiedenen Stellen erweitert werden.

Vorgehensweise:

1. Betrachtung aller möglichen Fälle von Bewertungsergebnissen für die verwendeten Kennzahlen, getrennt für die beiden Kategorien „Biogasproduktion“ und „Biogasverwertung“ ⇒ Variation ohne Wiederholung von vier Effizienzklassen für zwei Kriterien. Es errechnen sich $\frac{4!}{(4-2)!} = 12$ Fälle.

2. Identifikation weiterer Kennwerte der Biogasanlage, die als maßgeblich für das jeweilige Bewertungskriterium erachtet werden. Diese Kennwerte werden wiederum in Klassen eingeteilt (typischer Weise drei). Liegen zu einem Kennwert keine Daten vor, wird die Klasse für den Kennwert aus Regeln abgeschätzt (Beispiel für den Kennwert „Eigenwärmeverbrauch (EWV)“ in Tab. 9).

3. „Deklaration“ aller Unterfälle für die möglichen Variationen. Für jeden Unterfall wird in verbaler Form eine „Diagnose“ erstellt und es werden „Maßnahmen“ für die Beseitigung / Abmilderung der identifizierten Schwachstelle vorgeschlagen.

Liegt eine nicht plausible Konstellation von Bewertungsergebnissen vor, gibt das System einen entsprechenden Hinweis mit der Bitte um Überprüfung der Eingaben bei der Datenerfassung aus. Hierbei besteht die Schwierigkeit darin, auf Basis einer noch überschaubaren Anzahl an Kennwerten und Ausprägungsklassen richtige Aussagen zu treffen. „Richtigkeit“ bedeutet in diesem Fall, dass Maßnahmen empfohlen werden, die in der Tendenz zu einer Verbesserung des Anlagenstatus führen. Reichen die vorhandenen Angaben für eine richtungssichere Diagnose nicht aus, wird eine vage Formulierung verwendet, verbunden mit der Aufforderung zur Eingabe weiterer Daten.

Tab. 9: Regelwerk für die Abschätzung des Kennwertes „Eigenwärmeverbrauch (EWV)“

Gülle-Anteil	Massenanteil Gülle
NaWaRo	0-30%
Gemischt	30-80%
Gülle	80-100%

X

Temperaturbereich	Prozesstemperatur
Thermophil	48-55 °C
Mesophil	35-42 °C

X

Behälterform
liegend
stehend

⇒ 3 x 2 x 2 = 12 Fälle:

Nr.	Gülle-Anteil	Temperaturbereich	Behälterform	EWV
1	NaWaRo	Thermophil	liegend	hoch
2	NaWaRo	Mesophil	liegend	mittel
3	Gemischt	Thermophil	liegend	hoch
4	Gemischt	Mesophil	liegend	mittel
5	Gülle	Thermophil	liegend	hoch
6	Gülle	Mesophil	liegend	hoch
7	NaWaRo	Thermophil	stehend	mittel
8	NaWaRo	Mesophil	stehend	gering
9	Gemischt	Thermophil	stehend	hoch
10	Gemischt	Mesophil	stehend	mittel
11	Gülle	Thermophil	stehend	hoch
12	Gülle	Mesophil	stehend	hoch

4.2 Umsetzung in eine Web-Anwendung

4.2.1 Gesamtkonzept

Die entwickelte Methode zur Bewertung der technischen Effizienz und zur Schwachstellenanalyse für landwirtschaftliche Biogasanlagen sollte in eine praxistaugliche Anwendung in Form einer webbasierten Beratungshilfe umgesetzt werden. Mit diesem Werkzeug soll der Nutzer (Anlagenbetreiber oder Berater) die wesentlichen verfahrenstechnischen Kennwerte einer Biogasanlage berechnen und interpretieren können. Für die Anwendung wurde der Name „*Biogas Doc*“ gewählt.

Biogas Doc ist in drei Module gegliedert: (1.) den „Anlagenreport“ mit der Ermittlung der grundlegenden verfahrenstechnischen Kennzahlen, (2.) die „Effizienzbewertung“ mit der betriebsindividuellen Schwachstellenanalyse und der Möglichkeit zur vergleichenden Betriebsbewertung sowie (3.) die „Ursachenforschung“ für die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen (Abb. 9).



Abb. 9: Konzept der webbasierten Beratungshilfe „*Biogas Doc*“

4.2.2 Technische Umsetzung

Für die Umsetzung dieses Konzepts wurde eine Webanwendung als am besten geeignet erachtet. Als Webanwendung bezeichnet man eine Webseite, welche nicht nur Informationen darstellt, sondern auch vielfältige Interaktionsmöglichkeiten bietet. Webanwendungen bieten vergleichbare Funktionalitäten wie Desktopanwendungen, zeichnen sich aber durch eine deutlich höhere Flexibilität aus, d. h. jeder internetfähige Computer kann mit einem zeitgemäßen Browser auf die Webanwendung zugreifen. Spezielle Anforderungen an die Computerhardware oder das Betriebssystem bestehen nicht, wodurch die Nutzungsbarrieren minimiert werden. Der zentralisierte Betrieb auf einem Webserver garantiert, dass jeder Nutzer stets mit der aktuellen Programmversion arbeitet. Zusätzlich verkürzt ein solcher Betrieb die Reaktionszeiten bei der Fehlerbehebung oder Weiterentwicklung.

Es existieren vielfältige Vorgehensweisen und Verfahren bei der Realisierung von Webanwendungen. Im vorliegenden Fall werden die Seiten der Webanwendung mithilfe der Auszeichnungssprachen HTML (Hypertext Markup Language) und CSS (Cascading Style Sheets) sowie den Skriptsprachen JavaScript und PHP erstellt. Die aufgeführten Sprachen sind Standardsprachen im Bereich der Webentwicklung und werden von einer breiten Entwicklergemeinschaft gepflegt und weiterentwickelt.

Bei der Interaktion des Nutzers mit der Webanwendung schickt der Browser eine Anfrage an den PHP-Interpreter des Webserver (Abb. 10). Dieser führt den jeweils nötigen Quellcode aus und bezieht bei Bedarf Daten aus einer Datenbank. Die generierte Ergebnisseite wird an den Browser zurückgeschickt. Der Browser visualisiert die Ergebnisseite anhand des übermittelten HTML-Seitengerüsts und der darin enthaltenen Formatierungsanwei-

sungen. Mit Hilfe von JavaScript kann der Nutzer mit der dargestellten Ergebnisseite interagieren.

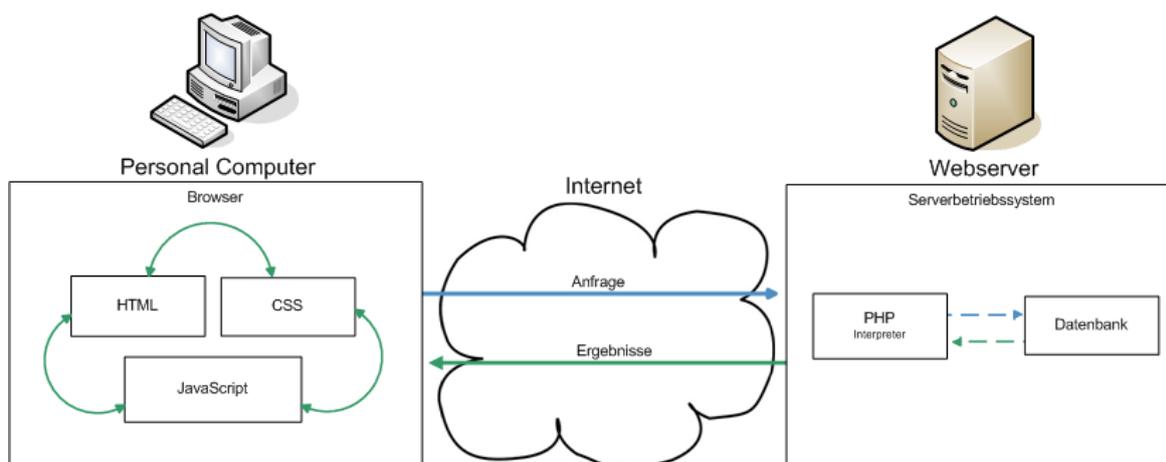


Abb. 10: Funktionsschema der Webanwendung

Der Nutzer erhält bei Aufruf der Webanwendung einen personalisierten Zugang mittels eines Datenbankkontos. In diesem Konto werden die eingegebenen Eingaben des Nutzers erfasst und gespeichert. Die Datenbank enthält die für die Anlagenbewertung erforderlichen Daten zum Stand der Technik und zum Betriebserfolg landwirtschaftlicher Biogasanlagen. In der derzeitigen Version erfolgt die Speicherung im Datenbankkonto temporär für die Dauer der Nutzung. Wird die Anwendung geschlossen, gehen diese Daten verloren. Zukünftig könnte eine Datenhaltung mit entsprechender Zugriffsregelung erfolgen, damit einzelne Nutzer oder Benutzergruppen wiederholt auf ihre Daten zugreifen oder Bewertungsergebnisse untereinander austauschen können.

4.2.3 Datenerfassung

Für die Erfassung der vom Nutzer einzugebenden Anlagendaten wurde eine hierarchische Navigationsstruktur aufgebaut, die sich in die vier Teilbereiche „Stammdaten“, „Anlage“, „Substrate“ und „Auswertung“ gliedert (Abb. 11). Diese hat gegenüber einer linearen Navigation den Vorteil der größeren Flexibilität, aber auch Komplexität (vgl. Abb. 12). Gleichzeitig wird eine bestimmte Reihenfolge der Eingabe vorgeschlagen, um ungeübten Nutzern eine Hilfestellung zu geben.

4.2.4 Datenauswertung

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Form von Tabellen und grafischen Darstellungen auf der Webseite. Zudem kann der Nutzer eine Zusammenfassung der Ergebnisse als Datei im pdf-Format aus der Anwendung exportieren.

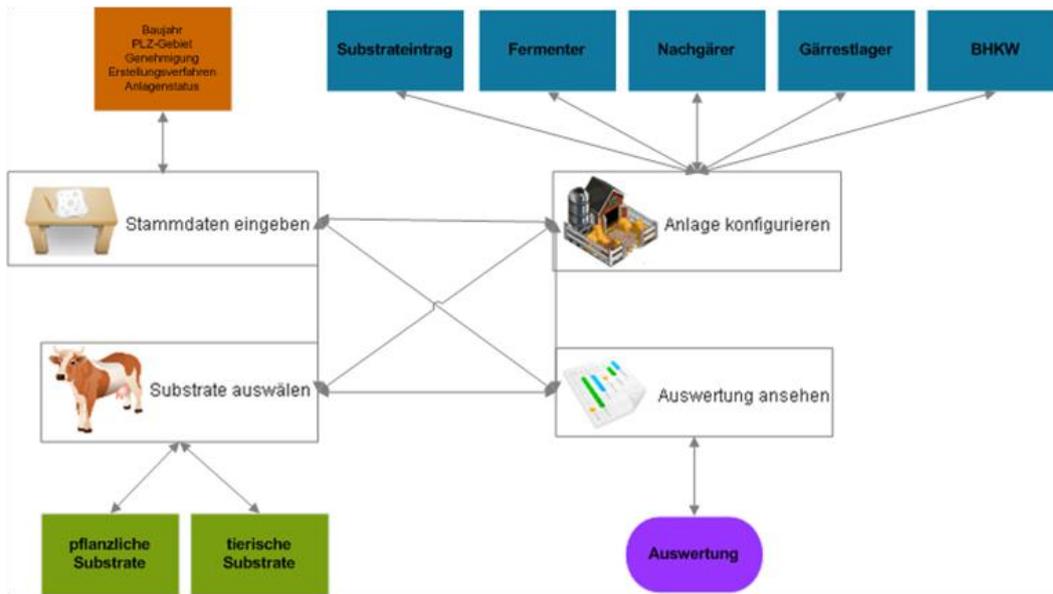


Abb. 11: Datenmodell für die flexible, hierarchische Navigation

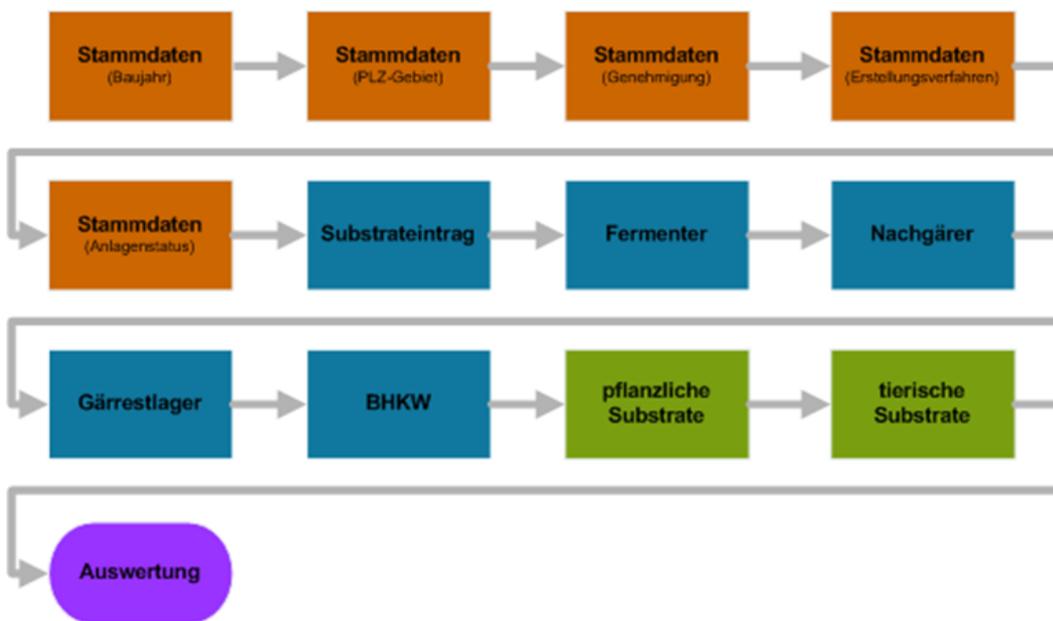


Abb. 12: Ablauf der Datenerfassung mit linearer Navigation

5 Ergebnisse und Diskussion

Zur Verteidigung der Bewertungsmethode werden im Folgenden die Ergebnisse der Anwendung der verschiedenen methodischen Ansätze auf einen Datensatz von zehn bayerischen Biogas-Pilotanlagen vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird der Gebrauch der Web-Anwendung anhand der Bewertung einer weiteren Pilotanlage erläutert.

5.1 Test der Bewertungsansätze mit einem Datensatz von den Bayerischen Pilot-Biogasanlagen

5.1.1 Ergebnisse der DEA

Verwendet wurden die normierten Werte der gewählten Eingangs- und Ausgangsgrößen für die zehn Biogasanlagen (Bezeichnung mit Buchstaben A bis J). Diese sind in Tab. 10 aufgelistet.

Tab. 10: Normierte Parameterwerte für die zehn Biogasanlagen (vgl. Tab. 2)

ID Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
I ₁	0,3004	0,2744	0,3858	0,2839	0,3294	0,5300	0,2187	0,1785	0,1678	0,3278
I ₂	0,2541	0,5247	0,3390	0,2358	0,3059	0,4242	0,1784	0,2805	0,2252	0,2338
O ₁	0,3061	0,2515	0,4512	0,3034	0,3183	0,4699	0,2357	0,1986	0,1788	0,3132
O ₂	0,0000	0,0000	0,7090	0,1714	0,3492	0,5377	0,0744	0,1456	0,1214	0,1230
O ₃	0,2275	0,3286	0,3119	0,2097	0,0572	0,6889	0,2684	0,2912	0,1436	0,2090

Die einzelnen Modelle der DEA lieferten unterschiedliche Rangfolgen für die Pilotanlagen. Das Ergebnis aus dem CCR-Modell war deutlich differenzierter als dasjenige des BCC-Modells (Abb. 13 und Abb. 14, jeweils linke Seite). Der Grund hierfür ist die flexiblere Form der Effizienz-Grenzlinie im letzteren Modell. Eine eindeutige Rangfolge aller zehn Anlagen konnte jedoch erst mit einem „Super-Efficiency“-Ansatz erzeugt werden (Abb. 13 und Abb. 14, jeweils rechte Seite). Während die ersten und letzten Ränge jeweils gleich waren, unterschieden sich die beiden Modelle im Mittelfeld deutlich.

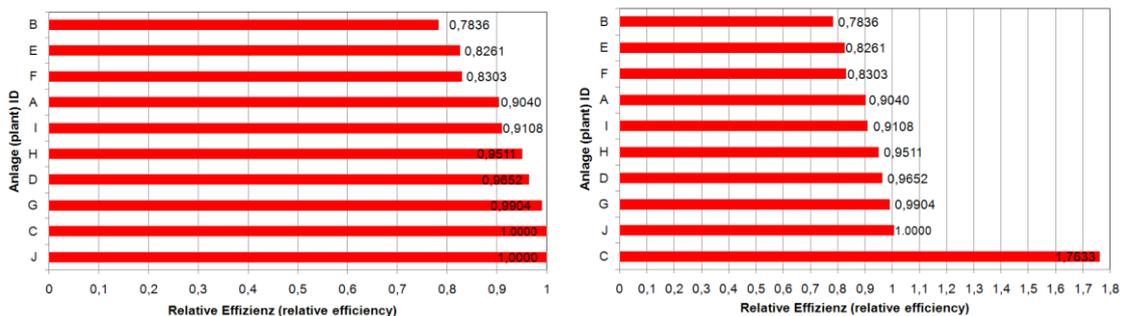


Abb. 13: Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: CCR-Modell (links), „Super-efficiency“-CCR-Modell (rechts)

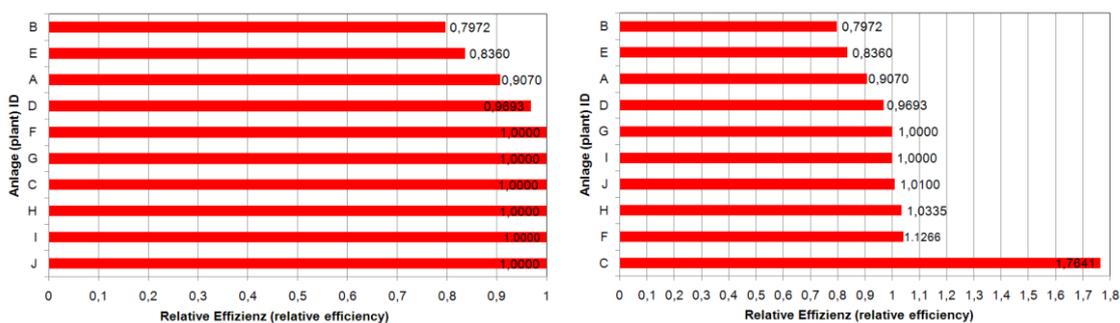


Abb. 14: Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: BCC-Modell (links), „Super-efficiency“-BCC-Modell (rechts)

Wurden die Treibhausgasemissionen als unerwünschter Output in die Analyse mit einbezogen, ergab sich eine nochmals geänderte Reihenfolge (Abb. 6, rechts). Die Anlagen mit hohen Gutschriften für vermiedene Treibhausgasemissionen rückten hierbei erwartungsgemäß deutlich nach vorne (Tab. 11).

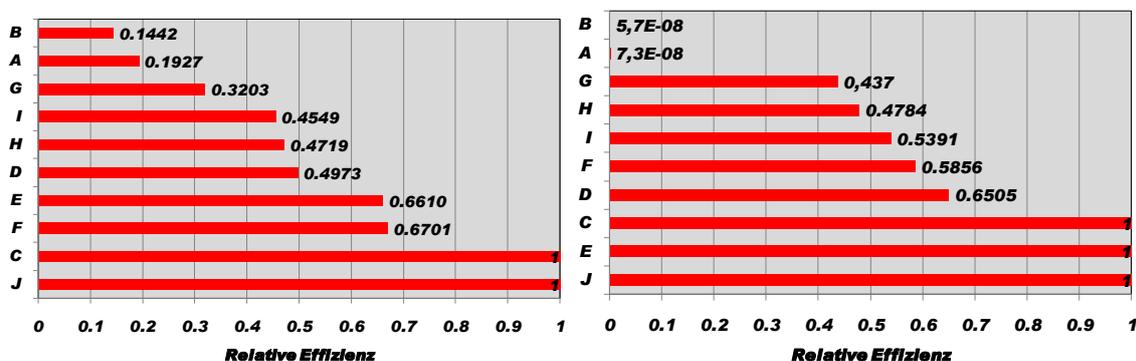


Abb. 15: Relative Effizienzwerte der Pilotanlagen: „Slack-based“-Modell (links), „Bad output“-Modell (rechts)

Mit Hilfe der DEA war es also möglich, die Biogasanlagen anhand eines einzelnen Effizienzmaßes in eine Rangfolge zu bringen, wobei diese Rangfolge deutlich von den verwendeten Analysemodellen abhängig war (Tab. 11). Die mit DEA ermittelten Effizienzwerte bilden keine Kardinalskala. Beispielsweise bedeutet ein Effizienzwert aus dem Super-Effizienz-CCR-Modell von 1,7633 für Anlage C im Vergleich zu einem Wert von 1,0000 für Anlage J nicht, dass Anlage C ca. 1,8 Mal effizienter ist als Anlage J.

Im Sinne der DEA-Methode war die verwendete Anzahl an Parametern bei Weitem nicht ausreichend, um die Gesamteffizienz des Prozesses der Biogasproduktion und -verwertung zu beschreiben. Als Nachteile der DEA-Methode sind zu nennen, dass die Gewichtungsfaktoren nicht beeinflusst werden können, dass die Biogasanlagen anhand der resultierenden Effizienzwerte nicht einfach in Effizienzklassen eingeordnet werden können und dass es sehr schwierig ist, aus der Vielzahl der existierenden Modelle das am besten geeignete auszuwählen. Hinzu kommt, dass es für den Fall, dass zwischen zu vergleichenden Anlagen fundamentale Unterschiede bestehen, diese also keine homogene Gruppe bilden, zweckmäßiger ist, spezifische an Stelle absoluter Kennzahlen zu verwenden.

Tab. 11: Rangfolge der Pilotanlagen aus unterschiedlichen DEA-Modellen (farbige Markierungen dienen dem besseren Erkennen von Gemeinsamkeiten bzw. Unterschieden zwischen den Ergebnissen)

Rang	CCR	Super-efficiency-CCR	BCC	Super-efficiency-BCC	Slack-based	Bad-output
1	C, J	C	J, I, H, C, G, F	C	J	C, E, J
2	G	J	D	F	C	D
3	D	G	A	H	F	F
4	H	D	E	J	E	I
5	I	H	B	I	D	H
6	A	I		G	H	G
7	F	A		D	I	A
8	E	F		A	G	B
9	B	E		E	A	
10		B		B	B	

5.1.2 Ergebnisse des AHP

Wie in Kap. 4.1.2 beschreiben, wurden normierte spezifischen Kennzahlen für den zweiten methodischen Ansatz herangezogen (Tab. 12). Mit Hilfe des Analytischen Hierarchie-Prozesses wurde hierbei aus den zehn Biogas-Pilotanlagen eine Auswahl an „Demonstrationsanlagen“ getroffen.

Bei der Ermittlung der Gewichtungsfaktoren mit einem externen Fachbeirat wurde der Schwerpunkt eindeutig auf die ökonomischen Kennzahlen gelegt, die mit rund 70% die Bewertung dominierten. Danach folgten mit einem Gewichtungsfaktor von knapp 11% die spezifischen Treibhausgas-Emissionen der Stromproduktion sowie mit rund 7% der Methan-Nutzungsgrad als Indikator für die Effizienz der Biogasverwertung. Als deutlich unwichtiger wurden die relative Methanausbeute, die Methanproduktivität, die Arbeitsausnutzung und der KEA Gesamt erachtet (Abb. 16).

Tab. 12: Normierte Kennzahlen der zehn Pilotanlagen

Kriterium	ID Anlage									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
K1	0,5464	0,7322	0,5758	0,6766	0,5065	0,0000	0,5612	0,7367	1,0000	0,6066
K2	0,2097	0,0608	0,2498	0,6559	0,6314	0,2222	0,6845	0,1787	1,0000	0,0000
K3	1,0000	0,6068	0,8940	0,5280	0,9818	0,8336	0,9566	0,8578	0,0000	0,7751
K4	0,0122	0,0000	1,0000	0,5508	0,5383	0,8000	0,3466	0,5923	0,3625	0,3519
K5	0,0079	0,2283	0,8189	0,2795	1,0000	0,5866	0,2756	0,0000	0,4291	0,4488
K6	0,0606	0,0000	0,9091	0,3333	1,0000	0,9697	0,0000	0,0303	0,2879	0,6515
K7	0,5500	0,0000	0,8300	1,0000	0,9400	0,9200	0,7200	0,5000	0,4300	0,8300
K8	0,4000	0,8500	0,7800	1,0000	0,0000	0,6800	0,3600	0,6100	0,9300	0,8200

Nach additiver Gewichtung dieser Faktoren ergab sich für die Pilotanlagen eine eindeutige Rangfolge gemäß Abb. 17. Wird die Bewertung in dieser Weise vorgenommen, so ist eine Kompensation zwischen den einzelnen Bewertungskriterien möglich. Die Normierung auf den realisierten Wertebereich hat zum Nachteil, dass Anlagen mit dem jeweils schlechtesten Wert für mehrere und insbesondere stark gewichtete Kriterien im Vergleich sehr stark abfallen (s. Anlage B). Dieses Problem könnte umgangen werden, indem nicht auf den Wertebereich der Stichprobe, sondern auf den der Grundgesamtheit normiert wird. Hierfür müsste dieser in geeigneter Weise abgeschätzt werden.

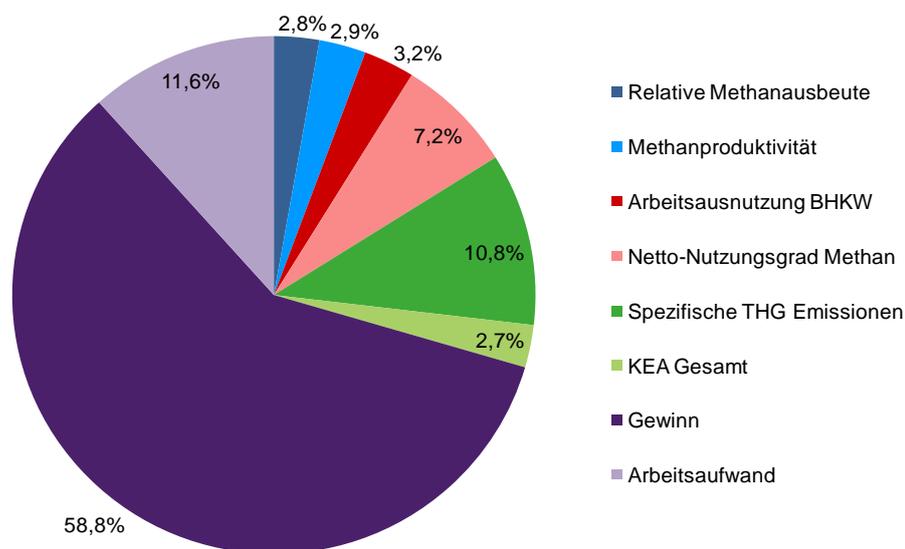


Abb. 16: Gewichtungsfaktoren für acht spezifische Kennzahlen nach AHP mit dem Fachbeirat Biogas der LfL

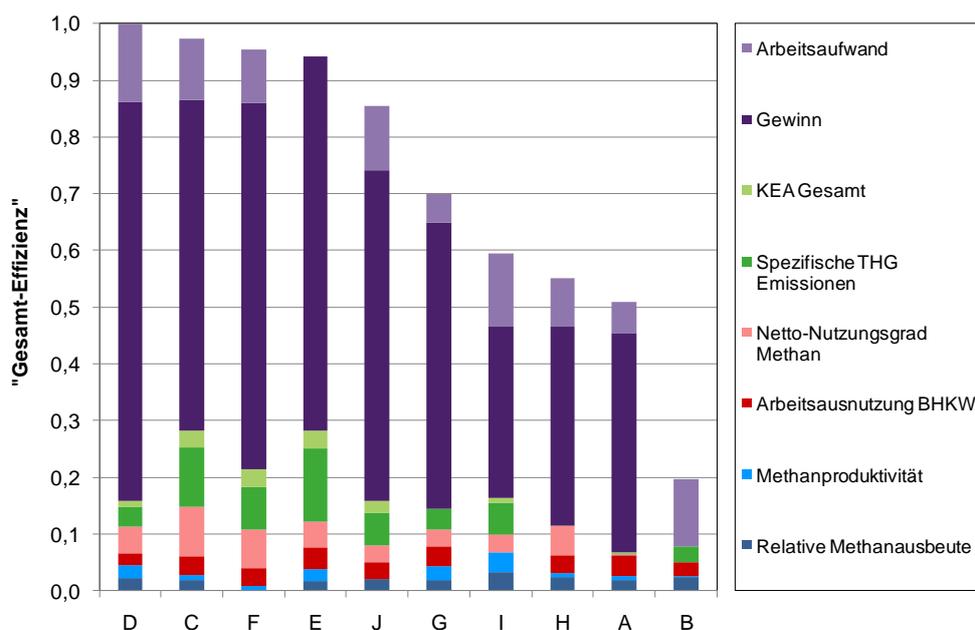


Abb. 17: Rangfolge der Pilotanlagen für die Auswahl der Demonstrationsanlagen nach AHP und additiver Gewichtung

Auch dieser methodische Ansatz lieferte lediglich eine relative Bewertung der Biogasanlagen (Ordinalskala). Als Vorteil dieser Methode ist zu nennen, dass die Stärken und Schwächen der zu vergleichenden Anlagen hinsichtlich der gewählten Kriterien rasch erkennbar sind. Die Anzahl der möglichen Bewertungskriterien ist wegen des Arbeitsaufwandes für den AHP allerdings begrenzt. Die Auswahl der Kennwerte ist damit umso wichtiger für die Aussagekraft der Methode.

Natürlich sind die Gewichtungsfaktoren und damit die resultierende Rangfolge abhängig von dem gewählten Expertengremium. Eine Wiederholung des AHP mit den Betreibern der Pilot-Biogasanlagen ergab ein überraschend anderes Ergebnis. Interessanterweise war hierbei das Übergewicht der ökonomischen Kennzahlen nicht mehr so groß (Abb. 18). Die Rangfolge veränderte sich hierdurch allerdings lediglich auf den vorderen vier Rängen (Abb. 19).

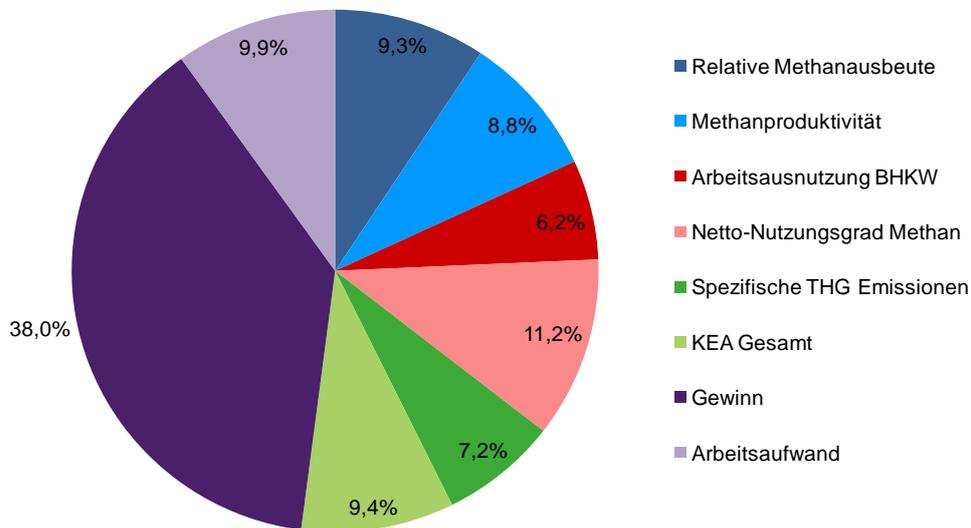


Abb. 18: Gewichtungsfaktoren nach AHP der Betreiber der Pilot-Biogasanlagen

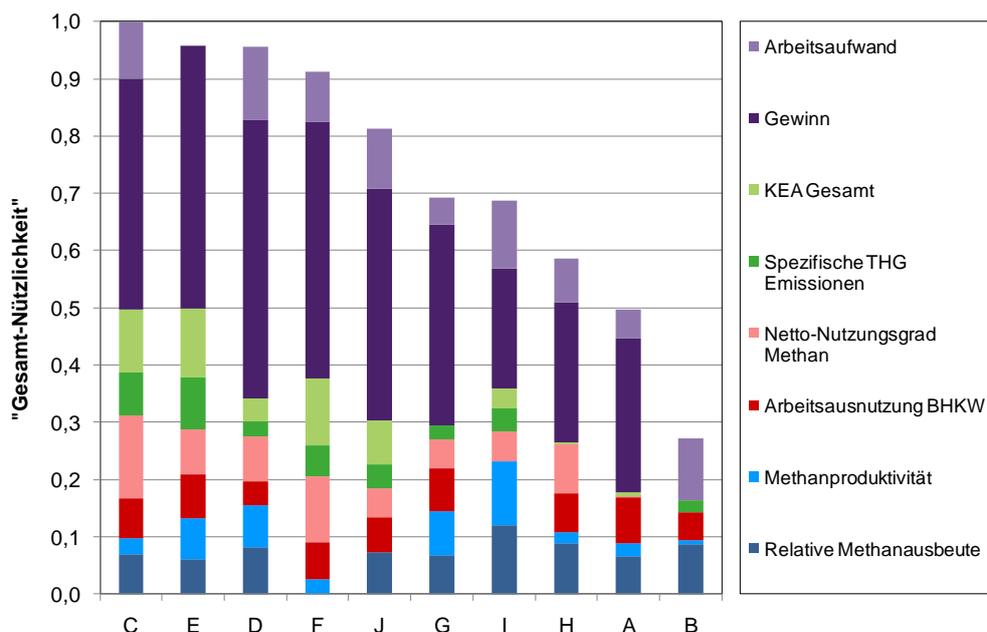


Abb. 19: Rangfolge der Pilotanlagen additiver Gewichtung mit veränderten Faktoren

Die Zusammenfassung von Kriterien aus unterschiedlichen Kategorien (Ökonomie, Technik, Umweltwirkung) ist grundsätzlich problematisch. Hierbei kann es zu Kompensationseffekten kommen. Diese könnten für die vorliegende Methode dadurch begrenzt werden, dass Schwellenwerte für einzelne Kennwerte eingeführt werden, die auf jeden Fall erreicht werden müssen. Alternativ kann eine Bewertung und Rangbildung getrennt nach Kategorien erfolgen.

5.1.3 Ergebnis des Bewertungsansatzes mit Fuzzy-Elementen

Mit dem dritten Bewertungsansatz unter Anwendung von Methoden der Fuzzy-Logik und der Fuzzy-Mathematik konnten die zehn Pilotanlagen einerseits in eine Rangfolge gebracht werden (relative Bewertung) und andererseits in Effizienzklassen eingeteilt werden, die sich am Stand der Technik orientieren (Tab. 13). Die Klassifizierung kann folgendermaßen interpretiert werden:

- „hervorragend“: Hervorragende Bewertung, praktisch keine Verbesserung mehr möglich;
- „gut“: Gute Bewertung, Verbesserung möglich;
- „ausreichend“: Ausreichende / durchschnittliche Bewertung, Verbesserung empfohlen;
- „mangelhaft“: Mangelhafte / unterdurchschnittliche Bewertung, Verbesserung erforderlich;
- „ungenügend“: Ungenügende Bewertung / schwer wiegender Mangel, Verbesserung dringend erforderlich.

In Tab. 13 fällt auf, dass das Ergebnis der Gesamtbewertungen (letzte Spalten) nicht „intuitiv“ aus den Einzelbewertungen abgeleitet werden kann. Dies beruht auf den sehr ungleichen Gewichtungsfaktoren aus der AHP (vgl. Tab. 5) und den Fuzzy-Berechnungen.

Tab. 13: Rangfolge und Klassifizierung nach Effizienzwerten der zehn Pilotanlagen als Ergebnis des dritten Bewertungsansatzes

ID	Biogas- produktion		Biogas- verwertung		Umwelt- wirkungen		Ökonomie		Gesamt- bewertung ¹		Gesamt- bewertung ²	
	Rang	Klasse	Rang	Klasse	Rang	Klasse	Rang	Klasse	Rang	Klasse	Rang	Klasse
D	2	74.22 (G)	8	27.34 (M)	6	45.84 (A)	1	90.47 (G)	2	64.17 (G)	1	83.35 (G)
E	4	69.54 (G)	3	47.09 (A)	1	79.12 (G)	2	80.83 (G)	6	52.54 (A)	2	83.17 (G)
C	5	66.22 (G)	1	75.22 (G)	2	72.14 (G)	4	66.75 (G)	1	75.43 (G)	3	74.75 (G)
J	9	59.42 (A)	7	28.25 (M)	4	55.35 (A)	3	68.68 (G)	5	58.03 (A)	4	67.66 (G)
F	10	41.32 (A)	2	53.83 (A)	3	64.96 (G)	5	61.92 (G)	4	58.21 (A)	5	65.77 (G)
G	3	71.95 (G)	5	38.19 (M)	7	41.69 (A)	6	59.05 (A)	9	41.37 (M)	6	60.35 (A)
I	1	88.59 (G)	9	13.45 (U)	5	51.28 (A)	7	32.92 (M)	3	61.52 (A)	7	40.83 (M)
H	6	64.87 (G)	4	40.96 (A)	10	30.58 (M)	8	28.87 (M)	8	42.22 (A)	8	36.18 (M)
A	8	61.18 (G)	6	30.53 (M)	9	31.35 (M)	9	26.31 (M)	10	34.76 (M)	9	32.86 (M)
B	7	62.25 (G)	10	9.64 (U)	8	39.03 (M)	10	13.48 (U)	7	48.83 (A)	10	22.08 (M)

¹) Bewertung ohne Einbeziehung des Kriteriums „Gewinn“; ²) Gesamtbewertung unter Einbeziehung aller Kriterien; E: „exzellent“; G: „gut“; A: „ausreichend“; M: „mangelhaft“; U: „ungenügend“.

Der wesentliche methodische Fortschritt bei diesem dritten Bewertungsansatz besteht darin, dass die Bewertung nun anhand vordefinierter Standards (Effizienzklassen) erfolgt, die nicht von der Auswahl der zu bewertenden Anlagenobjekte abhängen. Es können also jederzeit weitere Anlagen in die Rangfolge eingeordnet werden. Die Effizienzklassen können an technologische Entwicklungen oder veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden. Allerdings weist dieser Bewertungsansatz wie die meisten multikriteriellen Methoden die Schwäche auf, dass in der Gesamtbewertung eine Kompensation zwischen einzelnen Bewertungskriterien auftreten kann, was die Gesamtbewertung verzerrt.

5.1.4 Ergebnis der Fuzzy-Methode mit Expertensystem-Elementen

Das Ergebnis des vierten, abschließenden Bewertungsansatzes hat dieselbe Struktur wie beim dritten Bewertungsansatz, allerdings werden hier lediglich vier Effizienzklassen verwendet. Zu diesem Ansatz ist anzumerken, dass ohne die Kenntnis des zugrunde liegenden Regelwerks die Folgerungen für die Gesamtbewertung kaum nachvollziehbar sind. Auffällig ist, dass bei den Einzelaspekten jeweils mehrere Anlagen gleichauf liegen sowie bei der Gesamtbewertung die Anlagen E und F (Tab. 14). Die vergleichsweise schlechte Differenzierung der Anlagen hinsichtlich des Umweltaspekts kann auf die relativ große Unsicherheit der umweltbezogenen Kennzahlen zurückgeführt werden (vgl. Tab. 7).

Tab. 14: Rangfolge und Klassifizierung nach Effizienzwerten der zehn Pilotanlagen als Ergebnis des vierten Bewertungsansatzes

ID	Technischer Aspekt		Umweltaspekt		Ökonomischer Aspekt		Gesamtbewertung	
	Rang	EW (Klasse)	Rang	EW (Klasse)	Rang	EW (Klasse)	Rang	EW (Klasse)
D	2	26,5 (A)	1	62,5 (G)	1	82,7 (S)	1	50,0 (G)
C	1	62,5 (G)	2	62,4 (G)	3	48,6 (A)	2	49,5 (A)
J	5	16,8 (U)	1	62,5 (G)	2	54,2 (G)	3	48,4 (A)
E	3	26,2 (A)	1	62,5 (G)	4	37,5 (A)	4	37,5 (A)
F	5	16,8 (U)	1	62,5 (G)	4	37,5 (A)	4	37,5 (A)
G	5	16,8 (U)	4	36,8 (A)	5	34,2 (A)	5	30,2 (A)
H	4	25,8 (A)	5	30,4 (A)	6	21,9 (U)	6	26,2 (A)
B	6	14,4 (U)	7	25,0 (U)	7	13,7 (U)	7	17,2 (U)
A	7	16,8 (M)	3	37,5 (A)	8	13,2 (M)	8	14,3 (U)
I	7	12,6 (U)	6	26,2 (A)	9	12,6 (U)	9	13,7 (U)

EW: Effizienzwert; S: sehr gut; G: gut; A: ausreichend; U: ungenügend.

5.1.5 Vergleich der Testergebnisse

Die Ergebnisse der bisher angewandten Bewertungsmethoden wurden anhand der ermittelten Rangfolgen der Pilotanlagen einander gegenüber gestellt (Tab. 15). Obwohl eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des DEA-Ansatzes nicht gegeben ist, wurden diese teilweise mit in die Zusammenstellung aufgenommen.

Tab. 15: Gegenüberstellung der Rangfolgen der Pilotanlagen in der Gesamtbewertung nach unterschiedlichen Bewertungsmethoden

Rang	Fuzzy + ES	Fuzzy*	AHP*	DEA				
				CCR	SE-CCR	SE-BCC	Slack-based	Bad-output
1	D	D	C	C, J	C	C	J	C, E, J
2	C	E	E	G	J	F	C	D
3	J	C	D	D	G	H	F	F
4	E, F	J	F	H	D	J	E	I
5	G	F	J	I	H	I	D	H
6	H	G	G	A	I	G	H	G
7	B	I	I	F	A	D	I	A
8	A	H	H	E	F	A	G	B
9	I	A	A	B	E	E	A	
10		B	B		B	B	B	

*) Gewichtungsfaktoren gemäß Tab. 5; ES: Expertensystem; SE: Super-efficiency.

Vergleicht man die Rangfolge der Pilotanlagen aus dem AHP- mit derjenigen aus dem Fuzzy-Ansatz, so zeigen sich nur geringe Unterschiede (Tab. 15). Diese resultieren aus den Fuzzy-Berechnungen, ändern aber das Gesamtbild der relativen Anlagenbewertung nicht grundlegend. Jeweils zwei Anlagen tauschen die Plätze (C und D bzw. F und J). Etwas größere Unterschiede generiert der letzte Bewertungsansatz, insbesondere auf den hinteren Rängen. Anlagen E und F wurden hierbei gleichrangig eingestuft.

5.2 Beispiel für den Gebrauch der Webanwendung

Im Folgenden wird der Gebrauch der Webanwendung anhand einer beispielhaften Anlage erläutert. Nach Eingabe von Benutzerkennung und Passwort gelangt der Nutzer auf die Startseite des *Biogas Doc* und hier direkt in das Hauptmenü (Abb. 20). Die Startseite enthält außerdem die folgenden Rubriken:

- „Über diese Seite“: Antworten auf einige Fragen zum Umgang mit der Webanwendung;
- „Impressum“: Angaben zu Ansprechpartnern, zum Datenschutz und zum Haftungsausschluss;
- „Datenerfassungsbogen“: Formular im pdf-Format zum Ausdrucken für die handschriftliche Zusammenstellung der Anlagendaten;
- „Change Log“: fortlaufende Dokumentation der Programmversion und der erfolgten Änderungen.

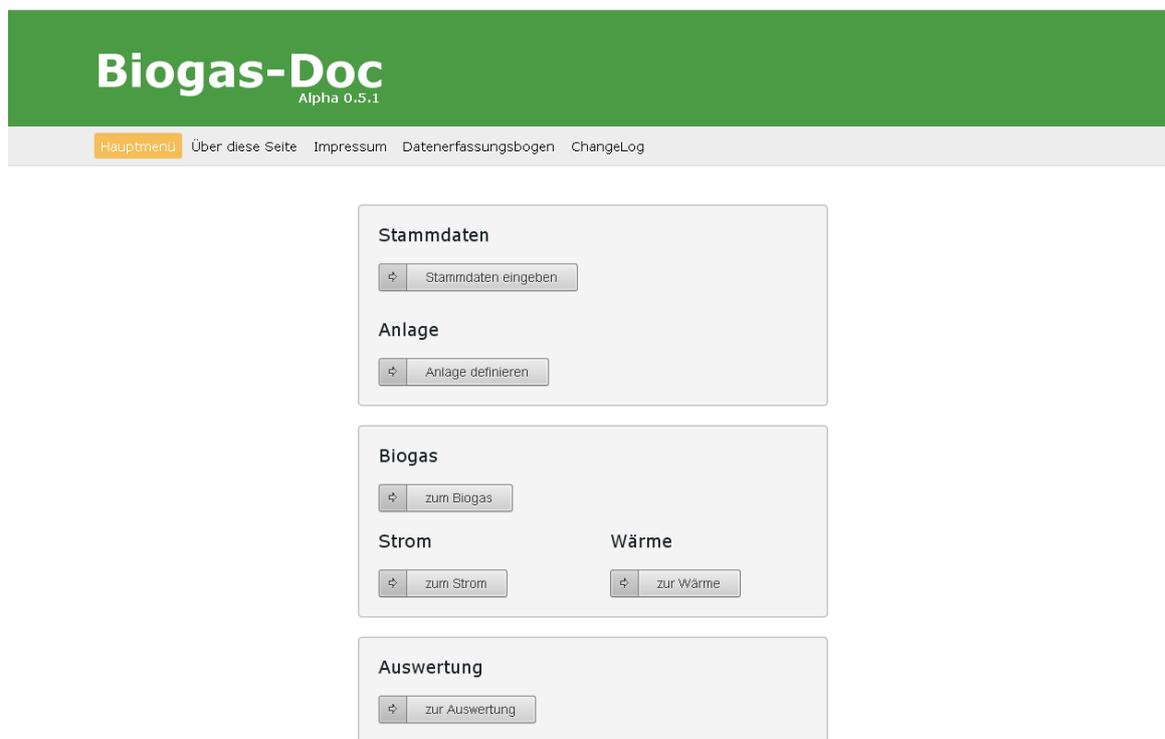


Abb. 20: Hauptmenü des *Biogas Doc* (Ansicht in Mozilla Firefox 11.0, Standardeinstellungen)

5.2.1 Datenerfassung

Standardmäßig ist die Datenerfassung im Hauptmenü von oben nach unten angeordnet. Unter „Stammdaten“ werden zunächst einige allgemeine Informationen zur Biogasanlage abgefragt, die für die Auswertung nicht von elementarer Bedeutung sind und auch dazu dienen, den Nutzer mit der Darstellungsweise und dem Gebrauch der Webanwendung vertraut zu machen (Abb. 21). Die Angabe dieser Informationen ist freiwillig.

The screenshot shows a web form with several sections:

- ▶ Jahr der Inbetriebnahme
- ▶ PLZ-Gebiet
- ▶ Genehmigungsverfahren
- ▼ Anlagenstatus
 - Wie ist der aktuelle Status der Anlage?
 - Anfahrbetrieb
 - Regelbetrieb
 - Erweiterungsarbeiten
 - Störung

Abb. 21: Erfassung der „Stammdaten“ (hier: Anlagenstatus)

Unter „Anlage“ erfolgt die Eingabe der Anlagenkonfiguration, standardmäßig in der Reihenfolge von links nach rechts (Abb. 22). Die Eingabelogik ist hierbei so, dass zunächst durch Auswahl des jeweiligen Anlagenkompartimentes ein entsprechendes Bauwerk bzw. Aggregat angelegt wird (Abb. 23), welches dann über das Auswahlfeld „bearbeiten“ spezifiziert wird.

The screenshot shows a navigation bar with 'Hauptmenü → Anlagenkonfiguration'. Below it, there is a row of six buttons, each with a plus sign and a label: 'Substrateintrag', 'Hydrolyse', 'Fermenter', 'Nachgärer', 'Gärrestlager', and 'BHKW'. At the bottom, there are two buttons: 'zurück' (with an 'x' icon) and 'weiter' (with a checkmark icon).

Abb. 22: Gliederung der Anlagenkonfiguration

The screenshot shows the same navigation bar as in Abb. 22. Below the row of buttons, the 'Substrateintrag' button is highlighted. Below this, the text 'Substrateintrag Nr. 1' and 'Typ nicht definiert' is displayed. To the right of this text are two buttons: 'bearbeiten' (with a pencil icon) and 'löschen' (with an 'x' icon). At the bottom, there are two buttons: 'zurück' (with an 'x' icon) and 'weiter' (with a checkmark icon).

Abb. 23: Anlegen eines neuen Aggregates / Bauwerks am Beispiel Substrateintrag

Im Falle des Substrateintrags wird abgefragt, um welche Einbringtechnik es sich handelt und wie oft am Tag Substrat in den Fermenter eingetragen wird (Abb. 24). Im Beispiel wählen wir „Schnecken“ aus und geben an, dass 24-mal täglich (also einmal pro Stunde) Substrat in den Fermenter eingetragen wird. Durch „speichern“ wird die Eingabe abgeschlossen, das Bauteil ist damit definiert.

Hauptmenü → Substrateintrag

Substrateintragstechnik

Einbringtechnik: ▼

Fermenterbeschickungen: [Stück pro Tag]



Abb. 24: Auswahl der Einbringtechnik

Das Anlegen und die Spezifikation weiterer Bauteile erfolgt analog. Bei den Gär- und Lagerbehältern ist die Angabe des Arbeitsvolumens in m^3 obligatorisch. Falls nicht bekannt, kann dieses aus den Angaben zur Fermentergeometrie berechnet werden (Abb. 25).

Pflichteingabe optionale Eingaben

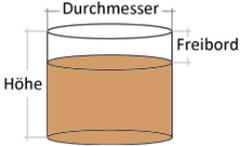
Arbeitsvolumen: 

▼ stehend zylindrisch

Durchmesser: [m]

Höhe: [m]

Freibord: [m]



▶ liegend zylindrisch

▶ liegend quaderförmig

Abb. 25: Berechnungshilfe für das Arbeitsvolumen von Behältern

Optional können an dieser Stelle auch die Prozesstemperatur sowie Ergebnisse von Laboranalysen eingegeben werden, welche dann in die Bewertung mit einfließen (Abb. 26).

Hauptmenü → Anlagenkonfiguration → Fermenter

Pflichteingabe
optionale Eingaben

Temperatur: **42 °C**

Gibt es Analysen des Gärgemisches?

Datum: <input type="text"/>	Probenintervall: regelmäßig ▾
Trockenmasse: <input type="text" value="8,9"/> [%]	Gesamtfettsäuren: <input type="text"/>
org. Trockenmasse: <input type="text"/>	Essigsäure: <input type="text" value="4,6"/> [g/L]
pH: <input type="text" value="7,9"/>	Propionsäure: <input type="text" value="0,61"/> [g/L]
Ammonium: <input type="text" value="2,4"/> [g/L]	iso-Buttersäure: <input type="text" value="0,18"/> [mg/L]
FOS/TAC: <input type="text" value="0,88"/>	

✕ zurück
✓ weiter

Abb. 26: Eingabemaske für die Erfassung von Prozesstemperatur und Laborergebnissen

Bei der Spezifikation des / der Blockheizkraftwerke(s) werden neben den Leistungsdaten der Motoren auch die Jahresvolllaststunden sowie die Betriebsstunden abgefragt. Letztere Angabe wird verwendet, um das Alter des Motors bei der Effizienzbewertung zu berücksichtigen. Abb. 27 zeigt die Eingabemaske für einen Zündstrahlmotor.

Hauptmenü → Anlagenkonfiguration → BHKW

Pflichteingaben

Welchen BHKW Typ verwenden Sie? Zündstrahlmotor ▾

Zündöltyp: Heizöl ▾

Zündölverbrauch: [l/Tag]

Installierte Leistung elektrisch: [kW]

Elektrischer Wirkungsgrad: [%]

Installierte Leistung thermisch: [kW]

Thermischer Wirkungsgrad: [%] fehlenden Wert berechnen

Jahresvolllaststunden: [h]

Betriebsstunden: [h]

✕ zurück
✓ weiter

Abb. 27: Eingabemaske für die Spezifikation eines Zündstrahl-BHKW

Die Seite „Anlagekonfiguration“ gibt eine Übersicht der Biogasanlage Abb. 28. Die Mindestkonfiguration einer Anlage besteht hierbei aus einem Substrateintrag, einem Fermenter

ter sowie einem BHKW. Fehlt eines dieser Elemente, wird eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben und der Nutzer aufgefordert, die fehlenden Angaben zu ergänzen.

Hauptmenü → Anlagenkonfiguration					
+ Substrateintrag		+ Hydrolyse		+ Fermenter	
+ Nachgärer		+ Gärrestlager		+ BHKW	
Substrateintrag Nr. 1	Schnecken			bearbeiten	löschen
Fermenter Nr. 1		770 m ³		bearbeiten	löschen
Nachgärer Nr. 1		770 m ³		bearbeiten	löschen
Gärrestlager Nr. 1		2.800 m ³		bearbeiten	löschen
BHKW Nr. 1		210 kW _{el}		bearbeiten	löschen
BHKW Nr. 2		180 kW _{el}		bearbeiten	löschen
<input type="button" value="zurück"/> <input type="button" value="weiter"/>					

Abb. 28: Übersichtsseite für die Konfiguration der Biogasanlage

Nach Eingabe der Anlagenkonfiguration geht es mit der „Substratkonfiguration“ weiter. Hierbei wird zwischen „tierischen“ und „pflanzlichen“ Substraten unterschieden, zudem können Hilfsstoffe mit angegeben werden. Die Eingabelogik ist analog zur Anlagenkonfiguration.

Pflichteingaben		erweiterte Eingaben	
Bezeichnung:	Mastschweinegülle Standard		
TM Gehalt:	8,1		[%]
oTM Gehalt:	82,6		[% TM]
Biogasausbeute:	420,0		[l _N /kg oTM]
Methangehalt:	60,0		[%]
Zugabemenge:	7200		[kg FM/Tag]
In welchen Fermenter wird es zugegeben?	Fermenter Nr. 1 (770 m ³)		
<input type="button" value="zurück"/> <input type="button" value="speichern"/>			

Abb. 29: Beispiel der Substratkonfiguration für Schweinegülle

Bei Eingabe der Substratbezeichnung werden Vorschläge aus einer Auswahlliste angeboten. In der Anwendung sind Standardwerte für die chemische Zusammensetzung und Verdaulichkeit der häufigsten Substrate hinterlegt, welche der Datenbank des Instituts für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur der LfL entnommen sind. Aus diesen Daten wird nach

dem Modell der Futterwertanalyse¹ der zu erwartende Biogas- und Methanertrag aus den Substraten berechnet. Liegen dem Nutzer eigene Analysenwerte vor, so kann er diese anstelle der Standardwerte eingeben und in die Berechnung einfließen lassen (Abb. 29). Optional werden Informationen zur Massenbestimmung, zum Einsatzzeitraum und zum Bezugsort bzw. der Lagerung der einzelnen Substrate abgefragt, die zwar nicht quantitativ ausgewertet, aber im Anlagenreport kommentiert werden.

Ist die Konfiguration der Anlage und der Substrate abgeschlossen, folgt die Erfassung der Leistungen der Biogasanlage in Form von Biogas, Strom, Wärme und Gärrest. Neben der Biogasmenge können Angaben zur Analyse und zur Entschwefelung des Biogases gemacht werden (Abb. 30).

Pflichteingabe optionale Eingaben

Wie wird das Gas analysiert?

- keine Analyse
- stationärer Gasanalysator
- mobiler Gasanalysator
- Messröhrchen

Wie sind die Gehalte folgender Inhaltsstoffe?

Datum:

Methan: %

Kohlendioxid: %

Sauerstoff: %

Schwefelwasserstoff: ppm

Wo wird das Gas für die Messung entnommen?

- vor dem Aktivkohlefilter
- nach dem Aktivkohlefilter
- kein Aktivkohlefilter vorhanden

Welche Verfahren werden zur Entschwefelung genutzt?

- intern chemisch
- intern biologisch
- extern chemisch
- extern biologisch

Abb. 30: Eingabemaske für die Erfassung der Biogasproduktion

¹ Siehe: Biogasanlagen - Berechnung der Gasausbeute von Kosubstraten, Ulrich Keymer, <http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/031560/>

Bei der Stromerzeugung muss zwischen Gesamteinspeisung und Überschusseinspeisung unterschieden werden (Abb. 31). Weiterhin werden Wärmeabsatz und Wärmebedarf abgefragt (Abb. 32).

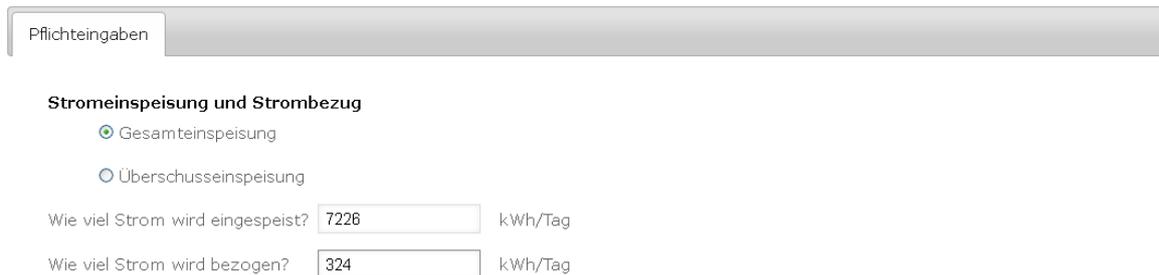


Abb. 31: Eingabemaske „Strom“ (Gesamteinspeisung)



Abb. 32: Eingabemaske „Wärme“

5.2.2 Auswertung

Nach Abschluss der Datenerfassung kann der Nutzer die Auswertung betrachten. Auf der Übersichtsseite werden ggf. die allgemeinen Angaben („Stammdaten“) zur Anlage wiedergegeben und von hier aus kann der Report für die einzelnen Anlagenbereiche sowie das Ergebnis der Effizienzbewertung aufgerufen werden (Abb. 33). Eine Druckversion des Anlagenreports und des Bewertungsergebnisses kann im pdf-Format heruntergeladen werden.



Abb. 33: Übersicht / Menü der Auswertung

5.2.2.1 Anlagenreport

Für die Einsatzstoffe fasst der Anlagenreport die eingegebenen mittleren Tagesmengen, die oTM-Gehalte und die theoretischen Biogas- / Methanausbeuten zusammen und berechnet daraus die gesamten eingesetzten Massen sowie die prognostizierten Werte für den Biogas- / Methanertrag (Abb. 34). Zudem werden (in erster Näherung) die Raumbelastung und die Verweilzeit für den Fermenter und den gesamten Gärraum ausgegeben. Daneben erfolgt eine zusammenfassende Einschätzung der Substratqualität, sofern hierzu Angaben gemacht wurden.

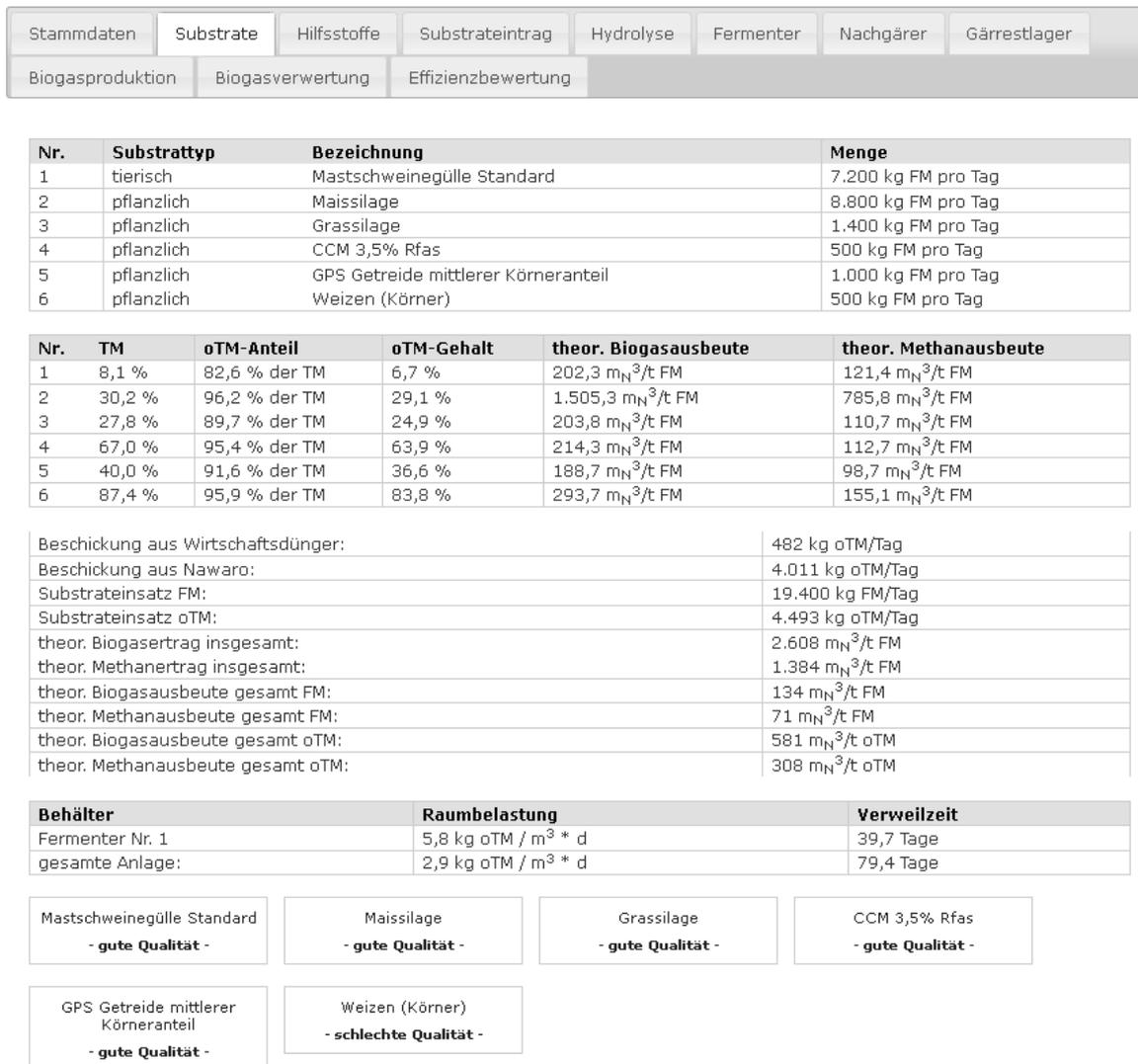


Abb. 34: Report zu den Einsatzstoffen / Substraten

Für den Fermenter und ggf. alle weiteren Gärbehälter fasst der Anlagenreport ebenfalls die Eingaben zusammen und gibt einen Kommentar zur Beprobung. Wurden Analyseergebnisse eingetragen, so werden diese im Vergleich mit gängigen Richtwerten im Hinblick auf das Risiko für eine Destabilisierung des Gärprozesses bewertet (Abb. 35). Dies erfolgt in Form von Cockpits mit Farbskala (grün: optimaler / unkritischer Wertebereich; Farbübergang gelb – orange – hellrot – dunkelrot: sehr kritisch).

Der Report zur Biogasproduktion enthält die Daten zur Menge und Qualität des Biogases sowie zusätzlich Angaben zu den Strom- und Wärmemengen. Die Biogasqualität wird analog der Analyseergebnisse für Proben aus den Gärbehältern im Vergleich zu Richtwerten beurteilt (Abb. 36).

Im Report zur Biogasverwertung werden standardmäßig die Angaben zu den BHKW zusammengefasst und die wichtigsten Kennzahlen für die Biogasverwertung errechnet. Auf Wunsch können weitere Kennzahlen angezeigt werden. Einzelne Kennzahlen werden grün angezeigt, solange sie innerhalb eines plausiblen Wertebereiches liegen (Abb. 37).

Ergebnisse



Abb. 35: Report zum Fermenter

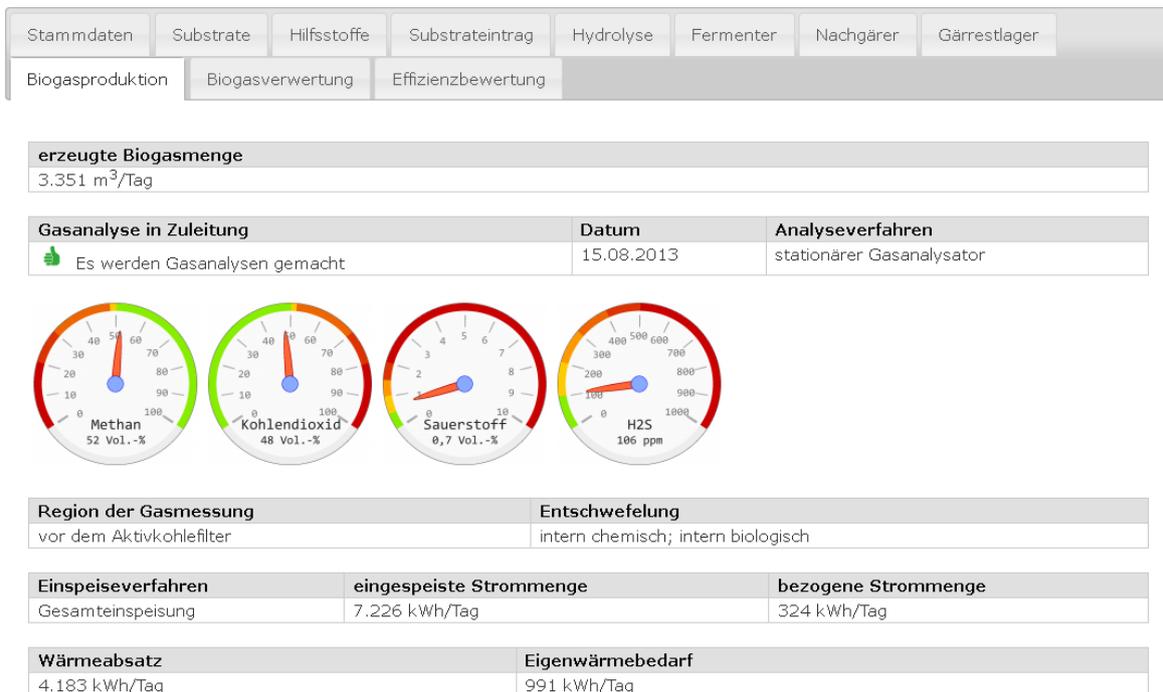


Abb. 36: Report zur Biogasproduktion

Stammdaten		Substrate		Hilfsstoffe		Substrateintrag		Hydrolyse		Fermenter		Nachgärer		Gärrestlager	
Biogasproduktion				Biogasverwertung				Effizienzbewertung							
Nr.	Typ	inst. el. Leistung	el. Wirkungsgrad	therm. Wirkungsgrad											
Nr. 1	Ottomotor	150 kW	39,9 %	50,5 %											
Nr. 2	Zündstrahlmotor	210 kW	42,0 %	40,0 %											
Nr.	Jahresvollaststunden	Betriebsstunden	Zündöltyp	Zündölverbrauch											
Nr. 1	7.029 h	15.000 h	-	-											
Nr. 2	7.914 h	48.000 h	Heizöl	45 l/Tag											
relative Biogasausbeute oTM:		128 %													
Methanproduktivität:		1,1 m _N ³ /(m ³ /d)													
elektrischer Nutzungsgrad:		39,3 %													
thermischer Nutzungsgrad:		27,4 %													
Anteil Eigenstrombedarf:		4,5 %													
Anteil Eigenwärmebedarf:		12,4 %													
Wärmenutzungsgrad extern:		52,3 %													
Netto-Nutzungsgrad Methan:		64,3 %													
relativer Stromertrag:		124 %													
Arbeitsausnutzung:		83,6 %													
weitere Kennzahlen anzeigen															
theoretische Stromausbeute:		5.845 kWh/d													
Biogasausbeute FM:		173 m _N ³ /t FM													
Methanausbeute FM:		89 m _N ³ /t FM													
Biogasausbeute oTM:		746 m _N ³ /t oTM													
Methanausbeute oTM:		385 m _N ³ /t oTM													
Biogasproduktivität:		2,2 m _N ³ /(m ³ /d)													
Stromausbeute FM:		372,5 kWh/t FM													
Stromausbeute oTM:		1.608,5 kWh/t oTM													
spezifischer Strombedarf FM:		16,7 kWh/t FM													
spezifischer Strombedarf oTM:		72,1 kWh/t oTM													
Netto-Stromausbeute FM:		355,8 kWh/t FM													
Netto-Stromausbeute oTM:		1.536,3 kWh/t oTM													
heizolaquivalent Wärmeabsatz:		420 l/Tag													
theoretische BHKW-Leistung elektrisch:		244 kW _{el}													
tatsächliche BHKW-Leistung elektrisch:		301 kW													
theoretische BHKW-Leistung thermisch:		333 kW													
Feuerungswärmeleistung:		737 kW													
theoretischer Methanbedarf:		2.109 m ³ /Tag													
Methanverbrauch:		1.729 m ³ /Tag													
Verstromungsfaktor Biogas:		2,2 kWh/m _N ³													
Verstromungsfaktor Methan:		4,2 kWh/m _N ³													
Zündölanteil energetisch BHKW 1:		2,5 %													
Stromkennzahl BHKW 1:		0,79													
Stromkennzahl BHKW 2:		1,05													
Stromkennzahl gesamt:		0,98													

Abb. 37: Report zur Biogasverwertung

5.2.2.2 Effizienzbewertung

Die Effizienzbewertung gibt die Bewertungsergebnisse, die sich aus der in Kap. 4.1.4 dargestellten Methode ergeben, in stark aggregierter Form wieder (Abb. 38). Es werden drei Bewertungsergebnisse ausgegeben: für die Biogasproduktion, die Biogasverwertung und – als Zusammenfassung der beiden Kategorien – für die sogenannte „Anlageneffizienz“. Die qualitative Bewertung („sehr gut“, „gut“, „ausreichend“, „ungenügend“) gibt die Einordnung in eine Effizienzklasse an. Die Cockpits zeigen diese Effizienzklassen anhand einer Farbskala: blau für „sehr gut“ über grün und gelb zu rot für „ungenügend“. Die Effizienzklassen sind im Hinblick auf den Verbesserungsbedarf der Biogasanlage wie folgt zu interpretieren:

- „sehr gut“: sehr gute Bewertung, praktisch keine Verbesserung mehr möglich;
- „gut“: gute Bewertung, gewisse Verbesserung ist möglich;
- „ausreichend“: ausreichende / durchschnittliche Bewertung, Verbesserung empfohlen;
- „ungenügend“: Ungenügende Bewertung / schwer wiegender Mangel, Verbesserung dringend erforderlich.

Die zugehörigen „Effizienzwerte“ (zwischen 0 und 100) werden durch den Zeiger im Cockpit sowie als Zahlenwert angezeigt. Anhand dieser „Effizienzwerte“ können beliebige Anlagen, die mit dem *Biogas Doc* bewertet wurden, in eine Rangfolge gebracht werden. Natürlich kann auch für dieselbe Anlage eine Bewertung über verschiedene Zeiträume erfolgen, z. B. um den Effekt einer Verbesserungsmaßnahme zu überprüfen.

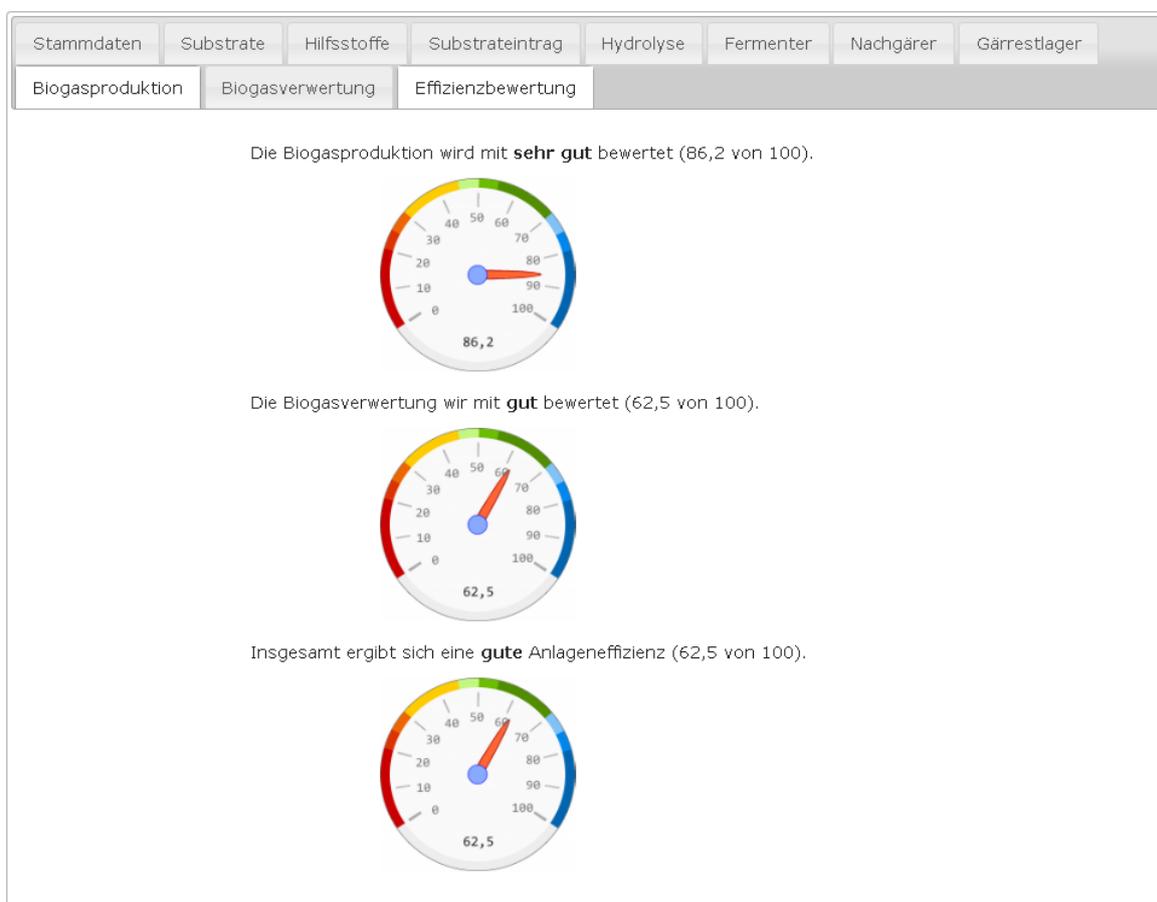


Abb. 38: Anzeige des Ergebnisses der Effizienzbewertung

5.2.3 Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung

Als weiterer Entwicklungsschritt für den *Biogas Doc* steht die Umsetzung des Moduls für die Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung aus. Dies wurde auch von den Fachberatern nachgefragt, welche die Anwendung bereits in der Praxis testen. Die Methode für dieses Modul existiert bereits wie in Kap. 4.1.4 dargestellt.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Projektziele der Entwicklung einer Methode für die auf Kennzahlen basierende technische Bewertung von Biogasanlagen und deren Umsetzung in eine Software-Anwendung (*Biogas Doc*) für die Kontrolle der technischen Effizienz von Biogasanlagen wurden erreicht. Damit stehen Werkzeuge zur Verfügung, mit denen ein Benchmarking von Biogasanlagen durchgeführt werden kann. Der *Biogas Doc* wird bereits von Projektmitarbeitern in den Fachzentren für Diversifizierung der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Beratung von Anlagenbetreibern eingesetzt. Denkbar wäre beispielsweise, dass sich eine Gruppe von Betreibern – mit oder ohne Unterstützung eines Beraters – zusammenschließt, um ihre Biogasanlagen vergleichend zu bewerten und Verbesserungsmaßnahmen gemeinsam zu diskutieren.

Von den Projektmitarbeitern an den ÄELF wurde mehrfach der Bedarf geäußert, auch das Modul für die Schwachstellenanalyse und Ursachenforschung in den *Biogas Doc* zu integrieren. Dies konnte aufgrund fehlender Personalkapazitäten an der LfL innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr geleistet werden. Es wird derzeit nach Möglichkeiten gesucht, dies bis Anfang 2014 umzusetzen.

Darüber hinaus existieren bereits weitere Ideen, wie der *Biogas Doc* funktional erweitert werden könnte. Insbesondere soll eine Möglichkeit geschaffen werden, Datensätze für die Anlagenkonfiguration zu exportieren und zu importieren. Für die kontinuierliche Kontrolle und Optimierung von Biogasanlagen bedarf es zudem einer Möglichkeit der Datenhaltung für Zeitreihen. Dies ist auch die Voraussetzung für eine zielgerichtete Ursachenforschung.

7 Veröffentlichungen aus dem Projekt

- Djatkov, Dj., M. Effenberger, A. Lehner, A. Gronauer (2009a): Untersuchungen zur Effizienz der Bayerischen Biogas-Pilotanlagen mittels Data Envelopment Analysis. 18. Symposium Bioenergie, 19./20. November 2009, Kloster Banz, Bad Staffelstein, OT-TI, Regensburg, ISBN 978-3-941785-07-6: 184-188
- Djatkov, Dj., M. Effenberger, A. Lehner, A. Gronauer (2009b): Assessing the Overall Efficiency of Bavarian Pilot Biogas Plants. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, LfL-Schriftenreihe 17/2009, ISSN 1611-4159: 707-716
- Djatkov, Dj., M. Effenberger, A. Lehner, A. Gronauer (2009c): Assessing the overall efficiency of biogas plants by means of Data Envelopment Analysis (DEA). PTEP 13(2): 139-142
- Effenberger, M., A. Lehner, Dj. Djatkov, A. Gronauer (2009d): Performance figures of Bavarian agricultural biogas plants. Contemporary Agricultural Engineering 35(4): 219-227
- Djatkov, Dj., M. Effenberger, A. Gronauer (2010): Vergleich der Prozesseffizienz in Biogasanlagen: Anwendung der Data Envelopment Analysis (DEA). Landtechnik 2/2010: 62-65
- Effenberger, M., Dj. Djatkov (2011): Monitoring and Assessing the Performance of Agricultural Biogas Plants. Proceedings "39th Actual Tasks on Agricultural Engineering", 22.-25. Februar 2011, Opatija, Kroatien, ISSN 1333-2651: 201-210
- Djatkov, Dj., M. Effenberger, A. Lehner, M. Martinov, M. Tešić, A. Gronauer (2012a): New method for assessing the performance of agricultural biogas plants. Renewable Energy 40(1): 104-112
- Djatkov, Dj., M. Effenberger, M. Martinov (2012b): Development of a method for assessing the performance of agricultural biogas plants. Proceedings "40th Actual Tasks on Agricultural Engineering", 21.-24. Februar 2012, Opatija, Kroatien, ISSN 1333-2651: 557-567
- Djatkov, Dj. (2013): Razvoj metode za ocenu efikasnosti rada poljoprivrednih biogas postrojenja primenom fazi logike i ekspertskih sistema (Development of a method for assessing the efficiency of agricultural biogas plants using fuzzy logic and expert systems). Dissertation, Fakultät der Technischen Wissenschaften, Universität Novi Sad, Serbien

8 Literaturverzeichnis

- [1] Strobl, M., Keymer, U.: Technische und ökonomische Kennzahlen landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Landtechnik* 61, 2006, Nr. 5: 266-267
- [2] Effenberger, M., Bachmaier, H., Kränsel, E., Lehner, A., Gronauer, A.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Herausgeber: LfL, Schriftenreihe Nr. 1/2010, Freising, ISSN 1611-4159
- [3] Bachmaier, H., Ebertseder, F., Effenberger, M., Kissel, R., Rivera Gracia, E., Gronauer, A.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern – Fortsetzung 2008-2010. Herausgeber: LfL, Schriftenreihe Nr. 5/2011, Freising, ISSN 1611-4159
- [4] Ebertseder, F., Kissel, R., Lehner, A., Rivera Gracia, E., Bachmaier, H., Effenberger, M.: Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen. Herausgeber: LfL, Schriftenreihe Nr. 8/2012, Freising, ISSN 1611-4159
- [5] FNR: Bundes-Messprogramm Biogas II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, 2009, ISBN 978-3-9803927-8-5
- [6] Siebert, G., Kempf, S.: *Benchmarking – Leitfaden für die Praxis*. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008, ISBN 978-3-446-41569-0
- [7] Strobl, M.: *Handbuch Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen*. 1. Auflage, HLBS-Verlag, Berlin, 2011, ISBN 978-3-89187-069-3
- [8] Madlener, R., Antunes, C., Dias, L.: Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *Eur J Oper Res* 2009, 197(3): 1084-94
- [9] Braun, R., Laaber, M., Madlener, R., Brachtl, E., Kirchmayr, R.: *Aufbau eines Bewertungssystems für Biogasanlagen - "Gütesiegel Biogas"*: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Steyr, Österreich, 2007
- [10] Cooper, W., Seiford, M., Tone, T.: *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses – With DEA-Solver Software and References*. Springer, New York, USA, 2006
- [11] Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill Inc., New York, 1980
- [12] Saaty, T. L.: Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Man Sci* 32(7): 841-855